I nuovi record negativi dei ghiacci dell'Artico

Le Scienze

Giugno 2018

€ 4,90

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

Le radici dei tumori

Le mutazioni genetiche precoci che favoriscono la formazione del cancro

Astrofisica

Lampi di luce radio dal cosmo profondo sconcertano gli scienziati

Neuroscienze

Un'ipotesi rivoluzionaria sulla trasmissione dei segnali nervosi

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 598 - 1 GIUGNO 2018

“OK Google, quante calorie ci sono in un gelato?”

Richiede una connessione Wi-Fi e uno smartphone/tablet compatibili

Google Home Mini

Il tuo Assistente Google in cucina

Google Store MediaWorld unieuro WIND 3

codice
EDIZIONI

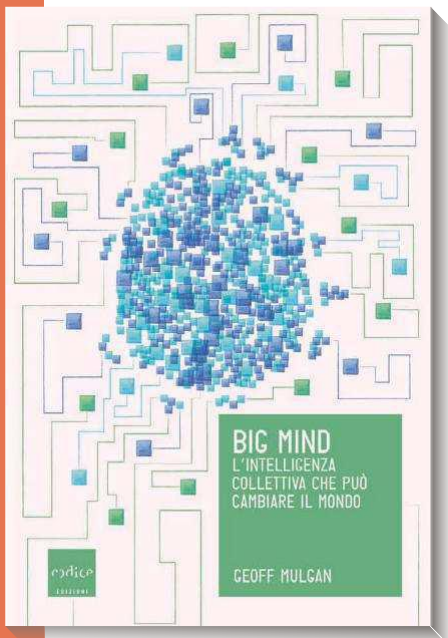
LUCA DE BIASE

IL LAVORO DEL FUTURO

pp. 192 | euro 15,00

NELLA GRANDE TRASFORMAZIONE TECNOLOGICA ED ECONOMICA DI QUESTI ANNI, SUL LAVORO DEL FUTURO SI ADDENSA UNA NEBBIA CHE OCCORRE DIRADARE.

LUCA DE BIASE RILANCIA E APPROFONDISCE UN'INCHIESTA SVILUPPATA PER "IL SOLE 24 ORE": CASE STUDIES, INTERVISTE E PROPOSTE PER UNO DEI TEMI PIÙ CALDI E URGENTI DELLA NOSTRA SOCIETÀ.



GEOFF MULGAN

BIG MIND

L'INTELLIGENZA COLLETTIVA
CHE PUÒ CAMBIARE IL MONDO

pp. 338 | euro 27,00

UNA PROPOSTA RADICALMENTE NUOVA PER AFFRONTARE LE GRANDI SFIDE ECONOMICHE, AMBIENTALI E SOCIALI.

UN'INTELLIGENZA COLLETTIVA CHE SIA IL FRUTTO DELLA COLLABORAZIONE TRA LE CAPACITÀ UMANE E LE POTENZIALITÀ DELLE MACCHINE.

facebook.com/codiceedizioni
twitter.com/codice_codice
instagram.com/codice_codice

codice
EDIZIONI

IN COPERTINA

Lo studio dei tumori in chiave evolutiva ha messo in luce un nuovo modello di formazione e diffusione delle metastasi, indicando anche quali geni mettere nel mirino delle terapie. (Credit immagine: Maurizio De Angelis/SPL/AGF)

Sommario

giugno 2018 numero 598

ASTRONOMIA

28 Lampi nella notte

di Duncan Lorimer e Maura McLaughlin

Gli astronomi cercano di chiarire che cosa provoca potenti lampi di luce radio nel cosmo remoto

INTELLIGENZA ARTIFICIALE

34 Robot autodidatti

di Diana Kwon

Macchine capaci di imparare come bambini danno indicazioni utili e importanti sul modo in cui mente e corpo lavorano insieme per aumentare conoscenze e abilità

AMBIENTE

42 Fusione

di Jennifer A. Francis

Il clima artico supera un record dopo l'altro, e questo altera le condizioni meteorologiche a livello globale

MEDICINA

48 L'albero del cancro

di Jeffrey P. Townsend

Le modifiche genetiche che permettono al cancro di svilupparsi emergono quando il tumore primario è ancora in uno stato incredibilmente precoce. Questa scoperta pone le basi per un nuovo e promettente approccio alla terapia oncologica

BIOLOGIA MARINA

56 La bestia perfetta

di Aditee Mitra

I mixotrofi, minuscole creature marine che cacciano come gli animali ma crescono come le piante, possono estendere la loro influenza dalle popolazioni ittiche al riscaldamento globale

NEUROSCIENZE

64 Ripensare il cervello

di Douglas Fox

Alcuni fisici, che hanno riconsiderato esperimenti di cinquant'anni fa, sostengono che i neuroni comunicano con impulsi meccanici anziché elettrici

SALUTE MENTALE

72 Prevenire il suicidio

di Lydia Denworth

Psicologi e ricercatori stanno sperimentando nuovi metodi per dissuadere le persone dal togliersi la vita

NEUROSCIENZE

80 L'enigma della coscienza

di Daniela Ovadia

Le teorie sull'origine della coscienza si dividono in base alla sua localizzazione. Un dettaglio non da poco, che influenza la scelta delle metodologie per risolvere il «problema difficile» della scienza moderna

Getty Images

Sommario

14

15

16

Rubriche

7 **Editoriale**
di Marco Cattaneo

8 **Anteprima**

10 **Intervista**
Il bello della chimica *di Marco Motta*

12 **Made in Italy**
Un occhio ai raggi X *di Letizia Gabaglio*

14 **Scienza e filosofia**
Un paradosso australe *di Telmo Pievani*

15 **Appunti di laboratorio**
La frequenza di nuove mutazioni *di Edoardo Boncinelli*

16 **Il matematico impertinente**
Che barba, la matematica! *di Piergiorgio Odifreddi*

17 **La finestra di Keplero**
Il cielo di Gaia *di Amedeo Balbi*

18 **Homo sapiens**
Una mandibola su due piedi *di Giorgio Manzi*

88 **Coordinate**
Una buona vita per tutti *di Mark Fischetti*

89 **Povera scienza**
Il verme del razzismo *di Paolo Attivissimo*

90 **La ceretta di Occam**
Pericolo solarium *di Beatrice Mautino*

91 **Pentole & provette**
Un mondo di latte *di Dario Bressanini*

92 **Rudi matematici**
Di gambe e di stinchi
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

94 **Libri & tempo libero**

SCIENZA NEWS

19 I problemi dei cervelli in miniatura
20 Una pioggia da asteroidi
20 Quando l'entanglement è paradossale
21 Come è fatta la telomerasi
21 Una nuova forma di DNA nelle cellule
22 Sensibili all'anidride carbonica
22 Pesci a rischio per il clima che cambia
24 La vita, cellula dopo cellula
24 Nuovi rischi dal virus della mononucleosi
25 Gli svantaggi del dimorfismo sessuale
25 L'odore della malaria
26 Brevissime

Ardea/SPL/AGF (*in alto*); Lewis Houghton/SPL/AGF (*al centro*); M_a_y_a/iStock (*in basso*)

di Marco Cattaneo

Se fonde il Polo Nord

Le temperature medie artiche crescono a velocità record

Cape Morris Jesup è la stazione meteorologica più settentrionale del mondo, ad appena 600 chilometri dal Polo Nord, dove il Sole tramonta a ottobre e non si fa più vedere fino a marzo. Lì il 20 febbraio, mentre dalle nostre parti ci lamentavamo del «gelo siberiano», la colonnina di mercurio è rimasta sopra lo zero per ventiquattr'ore filate. In un posto dove di solito in inverno si registrano temperature tra i –22 e i –30. E lo stesso accadeva in alcune località dell'Alaska. Nella regione artica, a fine febbraio, le temperature erano 20-25 gradi sopra la media stagionale.

A inizio maggio stava succedendo la stessa cosa, più o meno, con temperature superiori alla norma di 17 gradi. Ma non è tutto, anzi.

Sono almeno una decina – racconta Jennifer Francis in queste pagine – i parametri per cui il clima artico negli ultimi anni ha fatto segnare nuovi, preoccupanti record. Tra questi, l'estensione e il volume del ghiaccio nella stagione invernale, che sono scesi rispettivamente del 14 e del 42 per cento rispetto al 1979. E il vapore acqueo in atmosfera, che intrappola il calore contribuendo all'aumento dell'effetto serra.

Quarant'anni di studi hanno ormai accertato che l'Artico è estremamente sensibile ai cambiamenti climatici. L'aumento delle temperature nella regione è di 2-3 gradi superiore a quanto accade alle medie latitudini, vale a dire dalle nostre parti. E i dati che stanno emergendo di recente delineano un quadro molto poco rassicurante: se tutto va bene, le previsioni dei climatologi sono state fin troppo ottimistiche.

In genere, uno degli argomenti preferiti di chi minimizza l'impatto del cambiamento climatico è «ma la Terra è stata anche più calda di così». È innegabile. Ma è l'equivalente di nascondere la spazzatura – nemmeno la polvere – sotto il tappeto.

«L'ultima volta che l'Artico è stato poco più caldo di oggi», scrive Jennifer Francis, era 125.000 anni fa. A quel tempo *Homo sapiens* vagabondava in sparuti gruppi di cacciatori-raccoglitori e stava per avventurarsi per la prima volta fuori dall'Africa. Il livello degli oceani, si stima, era di 4-6 metri più alto di oggi. Se il rapido riscaldamento in corso portasse alla stessa situazione sparirebbero Miami, New Orleans, Manhattan, Venezia, Londra e Shanghai. È una delle differenze tra quando «la Terra è stata più calda di così» e oggi. E non mi pare trascurabile.

Ragnar Th. Sigurdsson/age fotostock/AGF

Comitato scientifico

Leslie C. Aiello
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan
docente di bioetica, Università della Pennsylvania

Vinton Cerf
Chief Internet Evangelist, Google

George M. Church
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Richard Dawkins
fondatore e presidente, Richard Dawkins Foundation

Drew Endy
docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Kaigham J. Gabriel
presidente e CEO, Charles Stark Draper Laboratory

Harold Garner
direttore, divisioni sistemi e informatica medici, docente, Virginia Bioinformatics Institute, Virginia Tech

Michael S. Gazzaniga
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Danny Hillis
co-presidente, Applied Minds, LLC

Daniel M. Kammen
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Vinod Khosla
Partner, Khosla Ventures

Christof Koch
presidente dell'Allen Institute for Brain Science di Seattle

Lawrence M. Krauss
direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle
docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer
docente, Massachusetts Institute of Technology

Lawrence Lessig
docente, Harvard Law School

John P. Moore
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan
docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak
direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Pievani
professore ordinario filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall
docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi
docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold
docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs
direttore, The Earth Institute, Columbia University

Eugenie C. Scott
Founding Executive Director, National Center for Science Education

Terry Sejnowski
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Shermer
editore, rivista «Skeptic»

Michael Snyder
docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides
docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe
direttore, Global Viral Forecasting Initiative

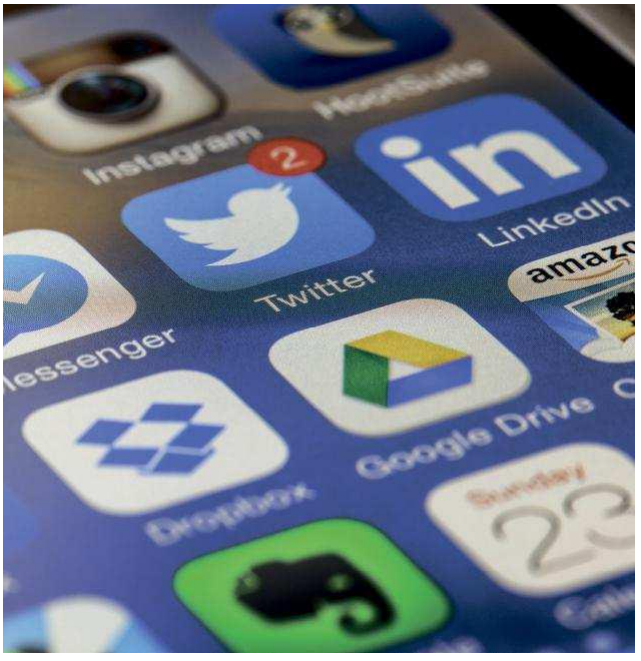
Anton Zeilinger
docente di ottica quantistica, Università di Vienna

Jonathan Zittrain
docente di legge e computer science, Harvard University

Il lato oscuro della rete

A richiesta a luglio *Silicon Valley: i signori del silicio*, un libro di Evgeny Morozov

Immersi come siamo nell'economia digitale abbiamo perso ogni attenzione critica verso il mondo della tecnologia, e così stiamo consegnando, inconsapevolmente o meno, le nostre vite e relazioni sociali a un pugno di aziende che stanno erodendo le fondamenta degli Stati caratterizzati da principi di solidarietà come il *welfare*. Questa tesi, controcorrente rispetto alla lettura più in voga dell'impatto delle tecnologie e applicazioni digitali (spesso riassunte in modo sbrigativo nella parola «Internet»), è opera di Evgeny Morozov ed è argomentata in *Silicon Valley: i signori del silicio*, libro allegato a «Le Scienze» di luglio e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni.



Il punto di partenza dell'autore, giornalista di origine bielorussa, analista di nuove tecnologie e docente alla Stanford University, è una promessa tradita che risale a qualche decennio fa. In quel periodo la rete Internet muoveva i primi passi di un cammino che l'avrebbe portata ad avvolgere ogni continente del pianeta, segnando l'inizio di una nuova era per l'umanità. Una delle promesse che accompagnava quel cammino era che la rete sarebbe stata intrinsecamente democratizzante, cosmopolita e destabilizzante per i poteri forti; in altre parole, il nascente villaggio globale avrebbe portato più diritti e uguaglianza economica e sociale per tutti.

Poco più di vent'anni dopo, argomenta Morozov, il villaggio globale egalitario non solo non si è materializzato, ma la rete è diventata simile a un feudo spartito tra multinazionali della tecnologia e servizi di *intelligence*. La possibilità di fruire di servizi a basso costo o gratuiti, come la connessione tra persone su social network (che siano pensati per ambiti lavorativi o sentimentali poco importa) o di soluzioni emerse dall'economia della condivisione (la *sharing economy*) non sono altro che il trionfo di una visione del mondo che ha come fine ultimo la soppressione delle nostre identità di cittadini a favore di quelle di consumatori, afferma in modo provocatorio l'autore. Accettiamo di sfruttare gratis un servizio cedendo in cambio il diritto a raccogliere, conservare ed elaborare i nostri dati personali, in altre parole cediamo il nostro spazio privato che è poi monetizzato per esempio con una profilazione per pubblicità o per proporci altri servizi ancora ma a pagamento, non di rado la versione più utile di quelli che abbiamo iniziato a sfruttare gratuitamente. Usiamo piattaforme che ci consentono di trovare una soluzione alla mobilità con soluzioni dirette tra privati, ignorando che quella piattaforma prospera su un'inefficienza o carenza di servizi pubblici per i quali però onoriamo il nostro contratto sociale tramite le tasse. Partecipiamo a una raccolta di fondi (*crowdfunding*) con le migliori intenzioni possibili, ma magari senza avere chiaro che il progetto a cui destiniamo una parte del nostro reddito è in difficoltà per tagli di finanziamenti pubblici dovute a misure di austerità.

Tutto questo, secondo Morozov, ha come epicentro, non solo simbolico, la Silicon Valley californiana, luogo d'elezione della nascita delle imprese che hanno rivoluzionato l'uso della rete, invadendo e disarticolando però uno spazio pubblico che non può più contare su un barlume di solidarietà. E questa dinamica è legata a doppio filo a una visione economica precisa. In altri termini, non è possibile frenare l'appetito economico delle aziende digitali se non si ripensa anche il modello dell'economia sui cui si agiscono.

Possiamo riconquistare la sovranità sulla tecnologia, afferma Morozov, a patto però di riconquistare prima la sovranità sull'economia e la politica.

RISERVATO AGLI ABBONATI

Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 9,00, incluso il prezzo di spedizione, telefonando al numero 0864.256266. La stessa offerta è valida per richiedere i volumi delle collane **I grandi della scienza a fumetti** e **I manga delle scienze**: in entrambi i casi gli abbonati possono acquistare i volumi al prezzo di € 9,90 incluse le spese di spedizione.

tomeng/iStock

In vacanza con la scienza

Questo mese a richiesta con la rivista il primo volume di *Esperimenti scientifici*

Le scuole sono chiuse, arrivano le vacanze e per gli studenti il tempo libero abbonda. Allora perché non impiegarlo in modo intelligente? Per esempio divertendosi con esperimenti da fare in compagnia e illustrati in *Esperimenti scientifici*, una collana di sei volumi pensata per i ragazzi tra i 7 e i 13 anni di età, ma che non mancherà di incuriosire anche i più grandi.

Il primo volume della serie ha come titolo *Giocare con la natura* ed è in edicola a richiesta con «Le Scienze» di giugno a 9,90 euro in più oltre al prezzo della rivista. Non serve altro che una bella giornata di Sole e materiali di uso comune; per il resto, grazie alle illustrazioni del libro, sarà possibile capire la riflessione della luce costruendo un periscopio con cui osservare animali senza farsi vedere; o magari capire l'importanza della fotosintesi facendo crescere delle piante in una scatola; o ancora, costruire una mangiatoia per farfalle (sembra banale, ma vi diamo un indizio: specie diverse di farfalle sono attratte da fiori differenti).

I volumi successivi della collana *Esperimenti scientifici* saranno in edicola con cadenza mensile, sempre allegati a richiesta con «Le Scienze». Da settembre, inoltre, in previsione della riapertura delle scuole, gli esperimenti proposti non saranno più da fare all'aperto, ma in casa. In ogni caso, buon divertimento!

PIANO DELL'OPERA

Esperimenti scientifici da fare all'aperto

GIUGNO
Giocare con la natura

LUGLIO
La potenza dell'acqua e dell'aria

AGOSTO
Le forze della Terra e del cielo

Esperimenti scientifici da fare in casa

SETTEMBRE
La chimica nel cibo

OTTOBRE
Costruire oggetti sensazionali

NOVEMBRE
Capire lo stato liquido

di Marco Motta

Il bello della chimica

Il Nobel Jean-Pierre Sauvage spiega che cosa sono le macchine molecolari e che cosa è la bellezza per un chimico, e dice la sua sul mancato premio a Vincenzo Balzani

Motori rotanti, ascensori e bus navette. Entrare nel mondo delle macchine molecolari è un po' come esplorare un giardino delle meraviglie, dove la realtà creata dai chimici sembra scivolare continuamente nella fantascienza. Può essere utile allora tornare alle origini di questo settore con uno dei suoi pionieri, il premio Nobel per la chimica Jean-Pierre Sauvage, che è stato il protagonista a maggio di un evento della serie *Guardare lontano: sulle spalle dei Nobel,* organizzato dal Museo della scienza POST di Perugia. In questa conversazione Sauvage rievoca i risultati fondamentali della sua carriera scientifica, dice la sua sul Nobel mancato al chimico italiano Vincenzo Balzani e spiega che cos'è la bellezza per un chimico molecolare.

Cortesia Giancarlo Belfiore (*questa pagina, in alto e al centro nella pagina a fronte*)

Partiamo dalla definizione di macchina molecolare.

È opportuno distinguere innanzitutto tra molecole complesse biologiche e molecole sintetizzate dai chimici. Nel passato le molecole artificiali erano considerate, a differenza di quelle biologiche, oggetti immobili, a parte i movimenti che avvengono in modo casuale, non controllato. Insieme ad altri ricercatori decidemmo che era arrivato il momento di far muovere queste molecole in maniera strettamente controllata. L'idea era imitare quello che succede nelle molecole biologiche, perché nel mondo biologico le macchine molecolari sono ovunque. Basti pensare al ruolo giocato nell'idrolisi e nella sintesi dell'ATP, il carburante della vita, da un grande enzima, che ruota più o meno come fa il motore di un ventilatore.

Molte persone si sorprendono a scoprire quanto sofisticati sono i motori molecolari, a volte è quasi inquietante a dire il vero. Ma d'altronde noi, come tutti gli organismi viventi, siamo pieni di questi motori molecolari, ce ne sono miliardi e miliardi. Quindi il nostro obiettivo era ispirarsi a questo tipo di motori e mimarne il funzionamento.

A metà degli anni ottanta lei progetta e sintetizza i catenani. Che cosa sono?

Il catenano più semplice è composto da due anelli intrecciati, come in una catena. All'epoca era innanzitutto una sfida riuscire a sintetizzare un sistema pur così semplice. Poi l'obiettivo successivo era far muovere questa molecola, in particolare far ruotare un anello all'interno dell'altro. Così facendo, ci saremmo avvicinati alla realizzazione di un motore rotante. Noi dimostrammo che eravamo in grado di programmare due molecole diverse in modo da ottenere questi due anelli intrecciati. Il secondo passo, non solo nostro ma anche di altri gruppi, fu capire come muovere il sistema in maniera controllata per creare vere e proprie macchine molecolari. Se siamo riusciti a ottenere questo primo risultato in maniera relativamente semplice il merito va, oltre alla buona idea che abbiamo avuto, anche alla chimica organica che lavorava con me, Christiane Dietrich-Buchecker.

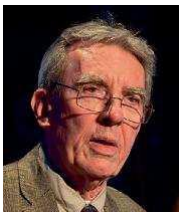
Un altro tipo di macchine molecolari su cui lei e altri colleghi avete lavorato sono i rotaxani, che possiamo immaginare come un asse che attraversa una ruota.

Usando i rotaxani, Fraser Stoddart con il suo gruppo ha realizzato una molecola *shuttle*, che è simile a un motore lineare, come un pistone che si muove dentro un cilindro. Poi Bernard Feringa ha creato dei motori rotanti. Il nostro gruppo ha realizzato un rotaxano complesso che si può comprimere ed estendere, come un muscolo, costituito da una piccola barretta lunga otto nanometri che si può comprimere fino a sei nanometri e poi riallungare alla lunghezza originale, insomma una sorta di nanomuscolo.

Quali applicazioni potrebbero avere questo tipo di macchine molecolari?

Voglio sottolineare che stiamo parlando di scienza di base, e di un'idea nuova, che era quella di far muovere delle molecole. Non puoi pensare di realizzare delle applicazioni rivoluzionarie se alla base non c'è stata un'idea rivoluzionaria per la conoscenza. Nel mondo delle macchine molecolari ci sono importanti applicazio-

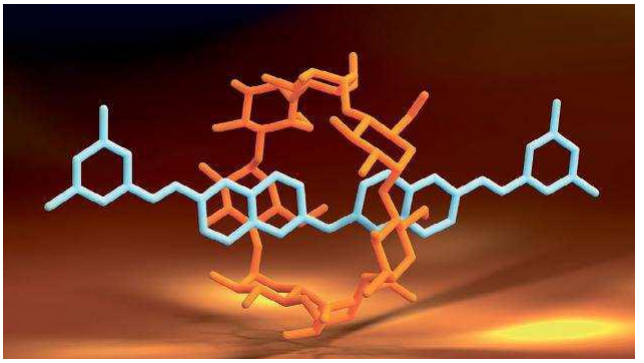
CHI È



Nato a Parigi nel 1944, pochi mesi dopo la liberazione della capitale francese, Jean-Pierre Sauvage ha vissuto un'infanzia nomade, trascorsa tra Algeria, Tunisia, Stati Uniti e varie città della Francia, al seguito del padre, un ufficiale dell'aeronautica.

Il suo percorso accademico è legato a doppio filo all'Università di Strasburgo, dove si è laureato in ingegneria chimica nel 1967, ha svolto il dottorato sotto la guida di Jean-Marie Lehn (Nobel per la chimica nel 1987), e oggi è professore emerito dell'Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires, oltre che direttore di ricerca emerito al CNRS. **Ha ricevuto** il premio Nobel per la chimica nel 2016 insieme al britannico Fraser Stoddart e all'olandese Bernard Feringa «per la progettazione e la sintesi di macchine molecolari».

A lezione. Sauvage durante la *lectio magistralis* tenuta a Perugia, e (*destra*) mentre autografa il manifesto che annunciava il suo intervento.



Macchina molecolare. Illustrazione della struttura del rotaxano, una delle macchine molecolari protagoniste del Nobel per la chimica del 2016.

Pasieka/SPL/AGF (*illustrazione rotaxano*)

ni potenziali. Per esempio il gruppo di Stoddard ha realizzato un dispositivo elettronico per memorizzare e processare informazioni basato sui rotaxani. Si tratta di nanochip con una densità di stoccaggio di memoria enorme. Ricordiamo che nei nostri computer, nei nostri cellulari è ormai tutto molto piccolo, ma dell'ordine di grandezza dei micrometri. Hewlett Packard ha investito molti fondi in questo tipo di applicazioni, ma siamo ancora lontani da una produzione su vasta scala.

E poi in medicina molti stanno lavorando all'ipotesi di macchine molecolari in grado di trasportare farmaci nel sangue, per trovare cellule cancerose e somministrare il farmaco in modo mirato. Altre applicazioni di lungo termine: pensiamo agli enzimi, che fanno un sacco di cose nel nostro organismo. Se un giorno riusciremo a riprodurre gli enzimi, che sono molto simili a macchine molecolari, sarebbe una vera rivoluzione. Gli enzimi lavorano a una temperatura di 37 °C, e sono incredibilmente efficienti nel realizzare una serie di operazioni molto complesse, che oggi non siamo minimamente in grado di riprodurre. Direi che il futuro delle macchine molecolari sarà degli enzimi artificiali.

Quando è stato annunciato il vostro premio Nobel per la chimica, in Italia si è molto parlato di Nobel mancato per Vincenzo Balzani, con il quale lei ha collaborato. Che ne pensa?

Non c'è dubbio alcuno che Vincenzo Balzani meritasse il premio Nobel. Ma il problema è che anche Feringa e Stoddard lo meritavano, su di me non mi pronuncio. Il fatto è che il comitato Nobel può scegliere al massimo tre nomi. Sarei stato più che felice se anche Vincenzo avesse vinto il premio e avessimo potuto festeggiare insieme. Siamo davvero buoni amici, abbiamo avuto ottime collaborazioni in passato e sono stato spesso a Bologna. Non posso giudicare sulle regole generali del premio, ma nel caso del nostro premio sarei stato davvero felice se avessero selezionato quattro nomi.

Nel romanzo *La chimica della bellezza* (Feltrinelli) di Piersandro Pallavicini c'è un suo alter ego letterario, Guillaume Chaleur. Che cos'è la bellezza per lei come chimico?

Posso dare la mia definizione come chimico molecolare, magari sarà diversa per chi si occupa di metallurgia, di ceramiche, oppure di scienza dei materiali. Direi che ci sono almeno due aspetti: definirei bella da un punto di vista intellettuale la strategia che porta alla sintesi delle molecole, e poi c'è la bellezza della forma delle molecole, la loro topologia; ai miei occhi sono belle come lo è un quadro, una scultura, sono davvero delle opere d'arte.

di Letizia Gabaglio

Un occhio ai raggi X

Xnext ha sviluppato un dispositivo innovativo che stabilisce la composizione chimica di un campione senza distruggerlo, rilevando corpi estranei in tempo reale

Zero difetti, nessun agente estraneo, niente imperfezioni, maggiori informazioni. È il mantra che gli ingegneri di Xnext ripetono da ormai otto anni. Il loro obiettivo infatti era sviluppare un sistema capace di ispezionare in tempo reale qualsiasi materiale per capire se va bene oppure no, se può essere venduto oppure va buttato, o ancora se contiene sostanze pericolose. E ora che l'obiettivo è stato centrato è arrivato il momento di mettere a frutto la tecnologia e di metterla alla prova in differenti campi.

«Il cuore del nostro progetto è il metodo innovativo che abbiamo sviluppato e brevettato, che si basa su l'uso non convenzionale dei raggi X», spiega Bruno Garavelli, CEO dell'azienda, ingegnere nucleare con un'esperienza lavorativa nel settore aerospaziale alle spalle. A impressionare Garavelli nel 2011 era stata proprio l'originalità del metodo. «I raggi X sono stati al centro del mio lavoro anche nell'aerospazio, perché mi occupavo dello sviluppo di dispositivi in grado di rilevare le emissioni delle stelle, fra cui anche questo tipo di radiazione elettromagnetica», prosegue l'ingegnere. «Dopo quell'esperienza mi sono formato alla scuola di Business Administration dell'Università Bocconi e poi ho cominciato a occuparmi di *scouting* di progetti innovativi e valorizzazione della proprietà intellettuale». È a questo punto, nel 2011, che Garavelli incontra un collega con cui aveva lavorato anni prima, Pietro Pozzi: «Lui aveva un'idea che a quel tempo era solo sulla carta. Me l'ha raccontata e io ho capito che non valeva solo un brevetto, ma un'azienda intera».

Tutti i colori

Comincia così la raccolta di fondi e di energie intorno al progetto che, nel 2014, grazie al coinvolgimento di centri di ricerca e di un finanziamento regionale, passa la *proof of concept*. I ricercatori dimostrano che è possibile usare tutti i colori della banda dei raggi X per ottenere la radiografia più precisa possibile di un materiale, per svelarne tutte le caratteristiche fisiche e chimiche. «Per capire la differenza che passa fra il nostro metodo e quello convenzionale è utile pensare di essere in una stanza illuminata da luce bianca. Se ho davanti una persona, grazie a quella luce riuscirò a vederne tutti i dettagli. Se a un certo punto la luce diventa solo rossa, cioè elimino alcuni colori, perdo molti dettagli e anche se aggiungo un colore, per esempio la luce blu, avrò ancora una visione deficitaria rispetto a quella data dalla luce bianca, che contiene tutti i colori», spiega Garavelli.

Allo stesso modo, se usiamo solo una parte della banda dei raggi X, così come si è fatto finora, si possono vedere solo alcuni particolari, non tutti. Gli scanner tradizionali calcolano l'attenuazione che i raggi X subiscono quando interagiscono con il materiale e così riescono a ricostruire l'immagine radiografica e a identificare eventuali difetti. Ma il metodo di Xnext, che ha dato vita allo scanner XSpectra, invece, usa tutti i livelli spettrali con il risultato di una «fotografia» precisissima che rivela contaminanti o corpi estranei altrimenti non rilevabili.

In più la tecnologia messa a punto è in grado di lavorare in tempo reale e senza distruggere il campione analizzato. «Anche qui segniamo una differenza importante rispetto alle metodologie usate oggi che controllano a campione, cioè selezionando solo alcuni lotti della produzione, che vengono distrutti», sottolinea Garavelli. Lo scanner Xnext quindi può essere montato sui nastri che trasportano i prodotti e fornire una risposta immediata, in un

LA SCHEDA

Xnext

Fatturato
1 milione di euro

Investimenti in ricerca
1,5 milioni di euro

Dipendenti/collaboratori
16 di cui 12 impiegati in R&S

Brevetti rilasciati
2

Foto cortesia autore (*team*); DawidKasza/iStock (*borsone*)

Per vari settori. A fronte in alto il gruppo di Xnext che ha sviluppato uno scanner a raggi X pensato per vari settori industriali e per i controlli di sicurezza.

vm/iStock (*impianto di riciclaggio*); zorazhuang/iStock (*fabbrica petrolchimica*)

millisecondo. Le prime macchine di questo tipo sono state adottate da industrie alimentari per le ispezioni di prodotti come passate di pomodoro o minestroni in cui è possibile ora scovare corpi estranei molto piccoli – frammenti di ossa, metalli, schegge di legno, insetti – che prima passavano inosservati.

Ma quello dell'industria alimentare non è che il primo passo: la stessa tecnologia può essere usata negli aeroporti per i controlli di sicurezza, perché rintraccia anche minime quantità di esplosivo eventualmente presente nelle valigie. «La nostra ricerca prosegue perché le potenziali applicazioni del nostro brevetto sono innumerevoli», prosegue il CEO. «Per esempio nell'ambito delle attività di riciclo dei materiali, per il quale stiamo portando avanti un progetto insieme al Consiglio nazionale delle ricerche». Pensiamo a quanti tipi di plastica esistono e come devono essere divisi per un riciclo ottimale: le tecnologie usate finora, per esempio, non permettono di differenziare i diversi tipi di plastica che appartengono alla stessa categoria – per intenderci, polipropilene e polietilene non sono riconosciuti come distinti – non riescono ad analizzare i pezzi più piccoli e fanno fatica con le plastiche scure.

Al contrario, XSpectra riesce a «vedere» dentro a tutti i polimeri e ne riconosce la diversa composizione e peso molecolare permettendo quindi un riciclo davvero efficiente, senza che peso, forma o colore del rifiuto influiscano sul risultato. Anche la densità dei materiali non è un problema: grazie ai raggi X usati al pieno delle loro potenzialità è possibile individuare le parti plastiche dei rifiuti elettronici, come TV, computer, o delle automobili. Lo scanner di Xnext riesce a individuare anche sostanze aggiunte alle plastiche, come i ritardanti di fiamma o altri additivi, indirizzandole al giusto percorso di smaltimento.

Guardando ancora più avanti, in futuro la tecnologia messa a punto da Xnext potrà essere usata per individuare specifici contaminanti nei cibi, per esempio le aflatossine contenute nei cereali, oppure per analizzare i diversi tipi di acqua. Ma la qualità delle immagini restituite con lo scanner, grazie a cui si ottiene un numero maggiore di informazioni, anche nel dettaglio, permette anche di usare meno radiazioni. L'applicazione nel campo medicale, per migliorare efficienza e diminuire i rischi associati alle tecniche di imaging, è quindi non solo uno sbocco possibile ma molto probabile – e appetibile dal punto di vista economico – per la tecnologia Xnext. Il mantra degli ingegneri promette di portarli lontano.

di Telmo Pievani
è professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche dell'Università degli Studi di Padova

Un paradosso australe

L'unicità dell'ornitorinco è sempre più comprensibile grazie a studi del suo genoma

Più che un animale, un rebus. Quel becco d'anatra innestato nel corpo di un castoro sembrò ai primi osservatori settecenteschi uno scherzo di natura o la sfida di un tassidermista in vena di burle. Ha i piedi palmati, ma con artigli (velenosi quelli posteriori nel maschio). Gran nuotatore, è coperto di pregiata pelliccia, eppure depone le uova. Alla schiusa, però, la madre allatta i cuccioli da pori nel ventre. Carnivoro e di predilezione notturno, non usa gli occhi sott'acqua e stana le sue prede grazie a elettrorecettori sul becco. Lui, semi-acquatico, e le quattro specie cugine di echidne compongono l'eccentrico gruppo di mammiferi ovipari noti come monotremi. La stranezza dell'ornitorinco ha stuzzicato filosofi e semiotici, che ne hanno fatto un paradigma di animale inclassificabile che sfugge alle categorie preconcette della nostra mente (e dunque incomprensibile e innominabile?), tanto che uno dei suoi primi appellativi tassonomici, datogli da Johann Blumenbach, fu *paradoxus*.

Come dare un nome a un tale esperimento di natura? Gli aborigeni pensavano che fosse nato da un incrocio mitico tra un'anatra e un ratto. L'errore è considerarlo un miscuglio chimerico, come se a posteriori un creatore dotato di senso dell'umorismo avesse giocato fondendo insieme parti di uccello, di rettile e di mammifero. In realtà, come già Darwin aveva intuito, l'ornitorinco non è a posteriori, è un apriori, nel senso che i suoi antenati monotremi si sono separati molto precocemente (160 milioni di anni fa circa) dal ramo che poi darà origine a marsupiali e placentati. Quindi la sua linea filogenetica risale molto indietro nel tempo, benché lui non sia né un fossile vivente né un anello mancante tra mammiferi e rettili. Per questo il suo genoma, sequenziato esattamente dieci anni fa, nel maggio 2008, con tanto di copertina su «Nature», presenta una congerie di geni altamente conservati che si ritrovano con funzioni analoghe in rettili e uccelli (connessi a formazione e sviluppo delle uova, alla produzione del veleno, alla determinazione del sesso attraverso ben dieci cromosomi). L'elettrolocazione invece si sarebbe evoluta più di recente attraverso la cooptazione funzionale di geni deputati all'olfatto.

L'ornitorinco insomma è un essere speciale, con biologia inusuale, e moderno a modo suo. Unica forma rimasta della sua famiglia e del suo genere, vive in Australia orientale e in Tasmania, soffre un po' come tutti degli effetti del riscaldamento globale e dell'inquinamento, ma per ora non se la passa malissimo rispetto ad altri endemismi. Ora il rebus naturalistico australe è un po' meno oscuro, grazie alle indagini molecolari massive. L'ultima, pubblicata su «Molecular Biology and Evolution» e guidata dall'Università di Oxford, si è basata per la prima volta sul sequenziamento completo del genoma di 57 ornitorinchi provenienti dai tre ceppi di Queensland, New South Wales e Tasmania, rivelando molti dettagli su struttura della popolazione, tassi di mutazione, demografia attuale e passata, sulla storia ecologica della specie.

Si scopre così che l'ornitorinco è piuttosto sedentario: anche se ci sono segni di passate migrazioni e dispersioni, di recente si è spostato poco e le tre popolazioni sono differenziate l'una dall'altra. Alcune hanno subìto colli di bottiglia importanti negli ultimi dieci millenni, a causa di crisi ambientali. I tre ceppi hanno un antenato comune vissuto circa un milione di anni fa, a sua volta discendente da una delle forme di ornitorinchi giganti che già abitavano l'Australia tra 15 e 5 milioni di anni fa.

Da questo rebus natante avremo altro da imparare. Se non altro perché il giorno in cui osserveremo mai una forma di vita aliena la nostra reazione sarà la stessa che ebbero i naturalisti settecenteschi davanti all'ornitorinco. Prima la chiameremo paradoxus, poi cercheremo di ingabbiarla nelle nostre categorie mentali, e infine ne comprenderemo l'unicità.

Non è uno scherzo. Il becco d'anatra in un corpo di castoro, ai primi esploratori del Settecento l'ornitorinco era sembrato uno scherzo della natura.

Ardea/SPL/AGF

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

La frequenza di nuove mutazioni

Questo parametro è essenziale per la sopravvivenza e l'evoluzione delle specie

Il nostro genoma è bersagliato continuamente dalla comparsa di nuove mutazioni. Non potrebbe essere diversamente, se si vuole che l'evoluzione biologica proceda. Ma quante sono queste nuove mutazioni per generazione? Qual è cioè il tasso di nuove mutazioni genomiche? Sappiamo da tempo che questo tasso è regolato geneticamente e talvolta sono stati individuati anche singoli geni capaci di controllare questo parametro essenziale per la sopravvivenza e l'evoluzione delle diverse specie. Un recente breve resoconto scientifico tratta proprio di questo spinoso argomento (Puglisi E., in «Science», Vol. 360, p. 143).

Spesso in passato è stato dato quasi per scontato che il tasso di mutazione fosse più o meno uguale in tutte le specie, e comunque non è mai stato agevole misurarlo con precisione. Le cose sono molto cambiate con la diffusione delle analisi genomiche comparate. Per esempio, si possono confrontare tra di loro le sequenze di un intero genoma di genitori e dei loro figli e «contare» le differenze, dovute ovviamente a nuove mutazioni. Avremo così una misurazione diretta del tasso di mutazione per generazione in quella specie. I primi dati così raccolti forniscono un quadro ancora incompleto, ma interessante della distribuzione del tasso di mutazione genomica nelle varie specie.

Per il momento quelle analizzate sono 40, ma se ne aggiungeranno presto molte altre. Da questi dati emerge abbastanza chiaramente una sorta di rapporto inverso tra il tasso di mutazione e l'ampiezza della popolazione in questione: molti organismi microscopici, per esempio, che hanno popolazioni enormi, mostrano un tasso di mutazione piuttosto basso, mentre molte specie a noi vicine, che hanno popolazioni di dimensione contenuta, sono il bersaglio di moltissime mutazioni per generazione. In questo modo le popolazioni piccole avranno più probabilità di evolvere in fretta, mentre le grandi indugeranno, essendo più capaci di sfruttare l'opera della selezione naturale e quindi già piuttosto ben adattate. Nelle popolazioni più piccole, d'altra parte, la deriva genetica, ovvero la variazione genetica casuale e non soggetta a selezione è più grande; in certi casi, molto più grande.

La dimensione delle diverse popolazioni deve essere valutata non sui valori attuali, ovviamente, ma come «popolazione effettiva» all'inizio o quasi della loro evoluzione. Così, per la nostra specie, che conta al momento più di sette miliardi di individui, occorre considerare una popolazione effettiva di circa 10.000 individui. Ciò spiega il nostro tasso piuttosto alto di mutazione, comparabile del resto con quello di altre scimmie, superiori o no. Accade sempre più spesso, in verità, che la misurazione di parametri biologici, anche sofisticati come l'aggressività, mostri una stretta affinità fra noi e le scimmie. La nostra storia evolutiva spiega quindi il nostro tasso di mutazione non trascurabile, che si palesa per esempio come probabilità di sviluppare tumori.

Si tratta di dati molto interessanti, non tanto in pratica perché la medicina è ancora lontana dalla capacità di tenerne conto, quanto in teoria, come parte del tentativo di capire sempre più a fondo i processi evolutivi.

Lewis Houghton/SPL/AGF

A tassi opposti. La nostra specie ha un tasso elevato di nuove mutazioni per generazione, mentre i batteri hanno dei tassi più bassi tra quelli misurati finora.

Oggi questi processi sono studiati attivamente, anche se pensiamo di sapere già molto di loro, mentre molte persone ancora non ci credono. Dopo una mia recente conferenza si è alzato un signore del pubblico che ha dichiarato che ormai tutti credono all'evoluzione biologica delineata dalla scienza. Lui però credeva anche all'ipotesi creazionista, come esposta nelle Sacre Scritture. In sostanza ammetteva entrambe le ipotesi, più o meno sullo stesso piano, come io credo che facciano molti italiani, non solo su questo argomento. Così vivono più tranquilli. L'ignoranza, in fondo, è la disposizione a parlare di cose che non si conoscono.

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

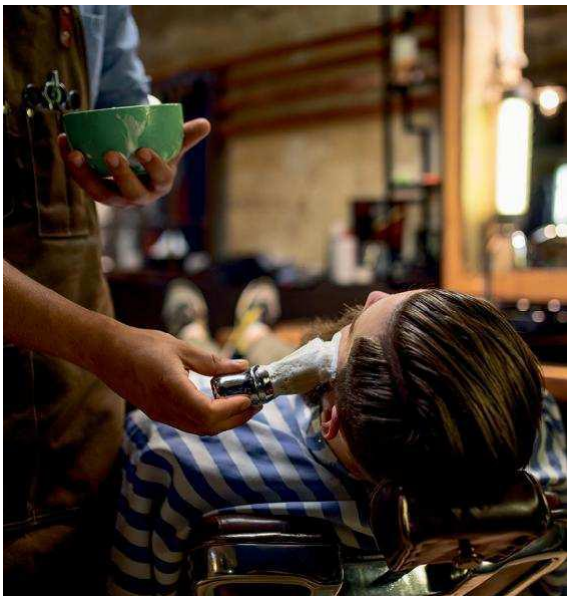
Che barba, la matematica!

Dal punto di vista matematico barba e capelli sono assai interessanti

Le interminabili e oziose discussioni filosofiche spesso fanno venire la barba, ma anche la barba stessa può a sua volta diventare oggetto di interminabili e capziose discussioni logiche. Lo dimostra un paradosso esposto da Bertrand Russell in *La filosofia dell'atomismo logico* (1918), oggi noto appunto come «paradosso del barbiere».

Si tratta di uno dei tanti modi escogitati da Russell per divulgare *urbi et orbi* un paradosso più tecnico che egli stesso aveva trovato nel 1903, e che aveva scosso i fondamenti della matematica. La divulgazione in questione era la seguente: «Il mio paradosso è estremamente interessante. Si può modificare in vari modi, alcuni validi e altri no. Una volta qualcuno me ne presentò una modifica non valida, domandando se un barbiere rade se stesso oppure no. Si può convenire che un barbiere rada tutti e solo quelli che non si radono da sé, e allora il problema diventa: chi rade il barbiere?»

La considerazione di un simile barbiere è effettivamente paradossale, perché se egli non si rade, allora è una delle persone che deve radere, e se si rade, è una delle persone che non può radere. Ma questo significa soltanto che un tale barbiere non esiste. O meglio, che nessun barbiere può soddisfare la convenzione fatta. Questa forma di paradosso è dunque innocua, perché dimostra solo che si è data una definizione impossibile.



Mestiere paradossale. Per illustrare un paradosso, il filosofo Bertrand Russell usò la figura del barbiere.

In genere i barbieri offrono trattamenti completi di «barba e capelli», e anche questi ultimi sono interessanti dal punto di vista matematico. Il calvo David Hilbert, per esempio, affermò un giorno a lezione di sapere che nell'aula c'era uno studente che aveva il massimo numero di capelli. La dimostrazione è semplice, perché ogni studente ha un numero finito di capelli, e nell'aula c'è un numero finito di studenti: si possono dunque ordinare gli studenti in base al numero dei loro capelli in una lista finita, che deve avere un primo elemento.

Naturalmente, il primo posto potrebbe essere condiviso, perché ci possono essere due o più studenti con lo stesso numero di capelli. Ma in una città come Roma ci devono essere almeno dieci cittadini con lo stesso numero di capelli. Gli abitanti sono infatti circa tre milioni, e possiamo supporre che almeno due milioni non siano calvi. Ora, il massimo numero di capelli che una persona può avere è circa 200.000. Dunque, il numero delle persone non calve è almeno dieci volte maggiore del numero dei capelli possibili: se anche la distribuzione dei capelli fosse uniforme, ci devono essere almeno dieci ripetizioni dello stesso numero.

Queste dimostrazioni sembrano trucchi, ma in realtà sono esempi di ciò che si fa nella matematica classica. È solo nella matematica costruttiva che non si accettano le dimostrazioni esistenziali che non forniscano esempi concreti di ciò di cui asseriscono l'esistenza: nei casi precedenti, che non indichino espressamente uno studente che ha il massimo numero di capelli nell'aula, o dieci abitanti con lo stesso numero di capelli a Roma.

Da questi esempi, sembrerebbe che la matematica classica sia un luogo in cui si «pettinano le bambole». Ma, a volte, si pettinano anche le palline da tennis, e più in generale le palle pelose: in questo caso, il famoso teorema del punto fisso di Brouwer dimostra che ci deve essere almeno una chierica, o una riga. Il che spiega perché i barbieri di solito propongano acconciature di quel genere, benché una testa normale (cioè, attaccata al collo e non completamente ricoperta di capelli) non sia una palla pelosa, e in quel caso il teorema non valga: infatti, si possono pettinare tutti i capelli all'indietro.

In termini matematici il teorema di Brouwer dice che su una superficie topologicamente equivalente a una sfera non esiste un campo di vettori tangenti che sia allo stesso tempo continuo e mai nullo. Una sua più seria applicazione alla circolazione dell'atmosfera terrestre spiega perché sul pianeta ci sia sempre almeno un punto in cui il vento è nullo, che corrisponde all'occhio di un ciclone o di un anticiclone.

I buchi neri invece non hanno peli o capelli, secondo una terminologia coniata da John Wheeler per un teorema della relatività generale che asserisce che la materia che cade in un buco nero sparisce e non lascia tracce «pelose», a parte l'informazione «corposa» sulla massa, la carica elettrica e il momento angolare. È dunque inutile tirare per i capelli la divulgazione al riguardo, anche se purtroppo e troppo spesso accade comunque.

M_a_y_a/iStock

di Amedeo Balbi
Professore associato di astronomia e astrofisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma «Tor Vergata». Il suo ultimo libro è *Dove sono tutti quanti?* (Rizzoli, 2016)

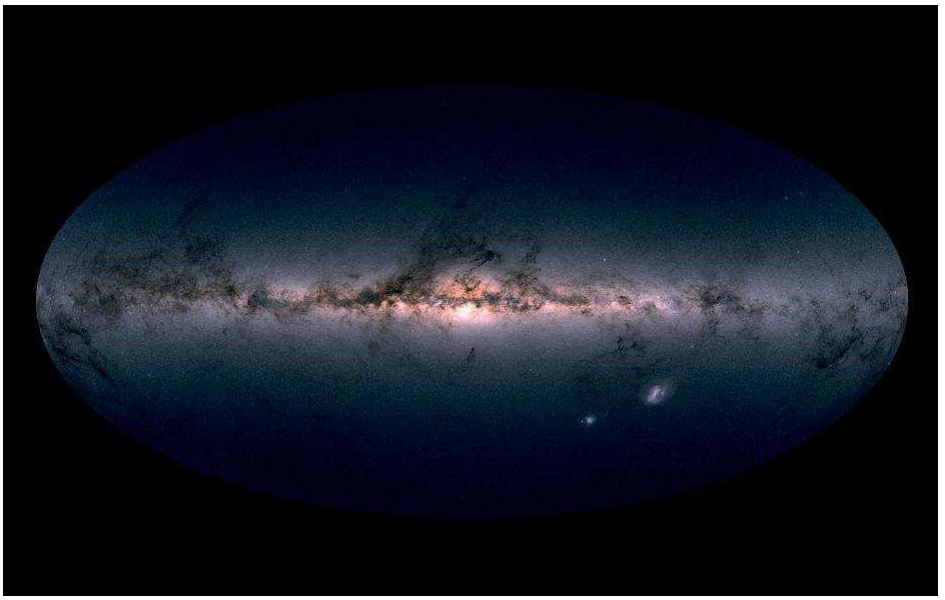
Il cielo di Gaia

Il satellite dell'ESA ha misurato la posizione di quasi due miliardi di stelle

Il rapporto tra l'umanità e il cielo stellato è antichissimo. Per i nostri antenati, lo spettacolo delle stelle è stato il primo incontro con un mondo vasto e misterioso, di cui non si riuscivano a scorgere i confini. Fin dall'inizio della civiltà, abbiamo dato nomi a quei punti luminosi, li abbiamo contati, abbiamo cercato di scorgere schemi e regolarità nelle loro geometrie. Era un modo per misurare il tempo o per orientarsi, oltre che per trovare un ordine nei fenomeni celesti. Per secoli, molto prima di arrivare a comprendere i meccanismi fisici del funzionamento dell'universo e degli oggetti celesti, l'astronomia è stata essenzialmente questo: lo studio della posizione delle stelle (e, quando possibile, della loro distanza).

Per questo, anche un astronomo babilonese (e forse, chissà, persino un uomo del Paleolitico) potrebbe cogliere la portata strabiliante del catalogo di dati resi pubblici lo scorso 25 aprile dal satellite Gaia dell'Agenzia spaziale europea, l'ESA (si tratta della seconda serie di dati, dopo quella rilasciata due anni fa, per una missione iniziata nel 2013 e che proseguirà fino al 2020). Basterebbe un semplice numero, quello delle stelle della nostra galassia di cui il satellite ha misurato la posizione nel cielo: 1,7 miliardi, circa un centesimo del totale. Una quantità impressionante, soprattutto se si pensa che le stelle che vediamo a occhio nudo, in condizioni ottimali, sono poche migliaia, e che il primo catalogo di posizioni stellari di cui è rimasta testimonianza storica, realizzato nel II secolo a.C. dall'astronomo greco Ipparco, conteneva appena 850 oggetti. Trent'anni fa, l'omonimo satellite Hipparcos dell'ESA – il primo dedicato alla misurazione delle posizioni stellari – ne raccolse oltre 100.000, e sembrava già un numero enorme. Ma è ormai quasi trascurabile rispetto a quello messo insieme da Gaia.

La cosa è ancora più straordinaria se si tiene conto che di circa 1,3 miliardi di stelle Gaia ha anche misurato la velocità sul cielo e la parallasse, ovvero il loro spostamento apparente dovuto al moto della Terra rispetto al Sole. Conoscere la parallasse di un oggetto celeste permette di misurarne la distanza. All'inizio dell'astronomia moderna, quattro secoli fa, l'osservazione delle parallassi stellari fu un obiettivo inseguito senza successo da generazioni di osservatori, un'impresa di incredibile difficoltà tecnica, paragonabile alla rilevazione delle onde gravitazionali o alla scoperta del bosone di Higgs per la scienza contemporanea. Oggi, il catalogo di parallassi di Gaia consente letteralmente di costruire un modello tridimensionale estremamente accurato della nostra galassia, quasi stella per stella. C'è un dato incredibile: la posizione sulla volta celeste di alcune stelle più brillanti del catalogo è nota con una precisione simile a quella che sarebbe necessaria per localizzare una moneta sulla Luna. In più, va aggiunto che il satellite ha raccolto dati anche sul colore e sulla luminosità delle stelle, il che permette per esempio di ricostruire il diagramma di Hertzsprung-Russell, uno strumento essenziale per lo studio delle popolazioni e dell'evoluzione stellare.



La Via Lattea. La nostra galassia vista da Gaia; la mappa mostra luminosità e colori delle stelle osservate dal satellite dell'ESA in ogni porzione del cielo tra luglio 2014 e maggio 2016.

Un piccolo assaggio di quello che sarà possibile tirare fuori dall'immenso catalogo di Gaia è contenuto in una serie di articoli scientifici che ha accompagnato la pubblicazione dei dati. I risultati preliminari ottenuti finora non si limitano allo studio della struttura della Via Lattea e delle proprietà delle sue stelle, ma spaziano dall'analisi di oggetti minori del nostro sistema solare fino all'osservazione di quasar su scale extragalattiche. È chiaro però che occorreranno anni prima di esplorare tutto il potenziale scientifico racchiuso in un insieme di dati così vasto e accurato.

ESA/Gaia/DPAC

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

Una mandibola su due piedi

Locomozione bipede e postura eretta avrebbero influito sull'assetto di questo osso

Un nuovo studio – per certi versi un po' «eretico», come vedremo – suggerisce una stretta relazione tra locomozione bipede e cambiamenti nell'occlusione dentaria, a partire dai nostri più antichi antenati, indicando che questi due processi chiave dell'evoluzione umana siano molto più concatenati fra loro di quanto si creda. La ricerca è stata pubblicata su «Scientific Reports» da un gruppo tutto italiano, coordinato da Pasquale Raia e dal sottoscritto (spero che l'autocitazione mi venga perdonata) e si è basata sulla morfologia dell'unico osso mobile del cranio: la mandibola.

Studiando un vasto campione di primati estinti e viventi, a partire dai più antichi resti fossili disponibili, abbiamo mostrato che il mascellare inferiore di noi esseri umani e dei nostri parenti più prossimi, come gli australopitechi e i Neanderthal, si è modificato nel corso degli ultimi milioni di anni più rapidamente che in qualsiasi altra scimmia del passato. Secondo noi, la spiegazione di questa sorprendente accelerazione evolutiva è da individuare nel nuovo assetto della mandibola dovuto all'acquisizione della locomozione bipede e della postura eretta, che ha portato il capo sulla sommità della colonna vertebrale, anziché davanti a essa. Il risultato dell'analisi dimostrerebbe cioè una relazione di causa-effetto tra bipedismo e occlusione dentaria.

Questa spiegazione ha qualcosa di «eretico» poiché finora si è ritenuto che le nostre caratteristiche dentarie e mascellari – come per esempio l'assenza di canini sporgenti, i molari relativamente grandi e le mandibole piuttosto corte e compatte – avrebbero innanzitutto un significato alimentare. Si sarebbero evolute cioè in risposta a cambiamenti ambientali tali da indurre (in parallelo, ma solo in parallelo con il bipedismo) profonde novità nella dieta dei nostri antenati, con conseguenti adattamenti nell'apparato di masticazione. Inoltre, la convinzione comune è che, con l'emergere del genere *Homo*, ulteriori variazioni nella forma della mandibola sarebbero dovute ai progressi tecnologici, come l'uso dei manufatti o il controllo del fuoco; infine sarebbe comparso quel nostro curioso mento, in qualche rapporto con la riduzione del resto della faccia.

Noi riteniamo invece che questi fattori, peraltro fra loro disomogenei, non sarebbero sufficienti a spiegare il rapido e costante cambiamento osservato a carico della mandibola negli ultimi milioni di anni; in particolar modo, se lo si confronta con quello che è accaduto in tutta l'evoluzione dei primati, che è durata dieci volte di più e che ha prodotto la varietà di adattamenti alimentari delle oltre 400 specie di lemuri e scimmie. In altre parole, l'evoluzione della forma della mandibola negli ominidi bipedi sarebbe stata troppo intensa rispetto a qualsiasi altro gruppo di primati per essere spiegata solo in termini di cambiamento di dieta.

Questo in pratica il nostro ragionamento. Per primo, nel nuovo contesto ambientale dell'Africa orientale di sei milioni di anni fa (o giù di lì) compare il bipedismo, come singolare adattamento locomotorio su cui non stiamo ora a indagare. Ne sarebbe conseguita una diversa conformazione dentaria: qui il discorso diventa decisamente più tecnico e coinvolge il tipo di occlusione, con particolare riferimento al complesso canino-premolare, alla riduzione del canino stesso e ai conseguenti cambiamenti a carico della serie dei premolari e dei molari. Solo a questo punto, come a cascata, sarebbe venute le nuove potenzialità masticatorie, che ci avrebbero consentito – in base a un meccanismo evolutivo che Stephen Jay Gould ed Elisabeth Vrba ci hanno insegnato a chiamare *exaptation* – l'accesso a nuove nicchie trofiche, aprendoci la strada verso nuove diete e nuovi adattamenti alimentari.

Sarà andata davvero così?

Altro che cibo. Le variazioni nella forma della nostra mandibola rispetto a quella di altri primati non sarebbero in origine dovute a cambiamenti nella dieta.

PHOTO 24/Getty Images

BIOETICA

I problemi dei cervelli in miniatura

Le colture tridimensionali di tessuti cerebrali sollevano questioni etiche

Simon Fraser/Mrc Unit, Newcastle General Hospital/SPL/AGF

In laboratorio. Le strutture 3D di tessuto cerebrale possono essere ottenute da colture di cellule adulte dell'organismo riprogrammate allo stadio di cellule staminali pluripotenti oppure da staminali embrionali.

In un racconto dello scrittore argentino Jorge Luis Borges, i cartografi imperiali diventano così bravi a disegnare mappe sempre più dettagliate ed esaurienti da arrivare alla mappa perfetta, così accurata che coincide con l'impero stesso. Ma a quel punto, che senso ha una mappa?

Fa venire alla mente Borges la discussione affrontata su «Nature» da 17 scienziati, eticisti e filosofi statunitensi guidati da Nita Farahany, della Duke University a Durham. Le colture tridimensionali di tessuto cerebrale, i cosiddetti organoidi, somigliano sempre più a cervelli in miniatura, preziosi per indagare funzioni complesse con esperimenti che l'etica precluderebbe in una persona viva. Se però diventano troppo simili a un cervello, non dovremo porci qualche scrupolo anche verso di loro? Che fare, per esempio, se questi grumi di tessuto acquisissero una qualche capacità di provare dolore o piacere, o persino di coscienza?

L'evenienza non è dietro l'angolo, perché siamo lontani da livelli di complessità simili. Ma non è neanche così inconcepibile come pochi anni fa. «Proprio per questo, il momento di rifletterci è ora», osservano gli studiosi. Quando avremo il dubbio di un organoide cosciente, come faremo a saperlo? Non è detto che i segnali di coscienza che riconosciamo nei cervelli adulti valgano per altre strutture, e già su questo occorre quindi ragionare. E poi, chi avrà diritti su di loro? Dopo l'uso si potranno semplicemente buttare via? Bisognerà assegnare loro un tutore, come per le persone incapaci?

Anche altri modelli di studio pongono i loro problemi. Per esempio, le chimere umano-animale, come i topi nel cui cervello è impiantato tessuto nervoso umano. Che limiti porre a questi ibridi, e quando diventeranno troppo umanizzati per trattarli come meri animali? «Secondo noi va deciso caso per caso, in base a rischi e benefici della situazione e alle sensibilità dei soggetti coinvolti» afferma Farahany. Persino le fette di tessuto ricavate da interventi chirurgici o autopsie, con gli sviluppi delle neuroscienze, richiederanno cautela, non foss'altro per quello che possono rivelare: oggi magari informazioni genetiche, e domani, chissà, tracce mnemoniche indiscrete che il titolare non gradirebbe pubblicizzare.

Queste e tante altre questioni richiedono una discussione aperta tra scienziati, eticisti, finanziatori e la società più ampia. «I grandi progetti di studio sul cervello ci stanno lavorando, ma va fatto di più, e i finanziatori dovranno intanto stilare indicazioni provvisorie. I comitati etici non sempre sono attrezzati per questioni così specifiche e dovranno ricorrere a esperti del settore».

Quel che non si può, invece, è fermare questi studi. «Vista l'importanza di questi modelli, anche in campo clinico, anche rinunciarvi non sarebbe etico».

Giovanni Sabato

PLANETOLOGIA

Una pioggia da asteroidi

Un esperimento avrebbe risolto il mistero dell'origine dell'abbondanza d'acqua sulla Terra

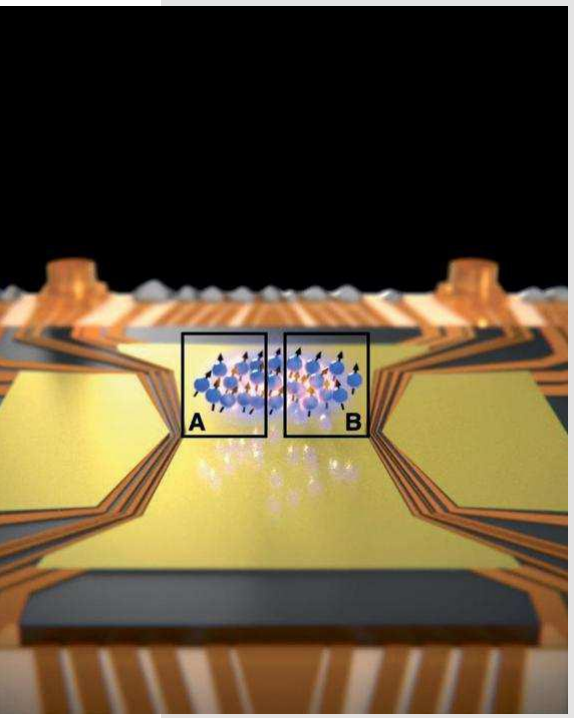
L'acqua sulla Terra è stata portata dagli asteroidi. Ad affermarlo su «Science Advances» sono Terik Daly e Peter Schultz, entrambi ricercatori della Brown University di Providence.
Uno dei problemi principali dei planetologi è capire come il nostro pianeta possa essere così ricco di acqua. Fra le ipotesi più accreditate c'è proprio quella che tira in ballo asteroidi e comete come serbatoi e vettori di questa acqua. A sostegno di questa ipotesi c'è anche il fatto che la composizione isotopica dell'acqua terrestre è molto simile a quella osservata negli asteroidi e nelle comete, osservazione che fa supporre che abbiano un'origine comune.

Il problema però è capire come quest'acqua può essersi trasferita durante gli impatti, che certamente furono numerosi durante le prime fasi di vita del nostro sistema planetario. Tuttavia, dato il calore sviluppato durante l'impatto e le alte velocità coinvolte, l'acqua liberata dalle rocce avrebbe dovuto rapidamente vaporizzarsi e sfuggire alla cattura.

Per studiare i possibili meccanismi di trasferimento dell'acqua dagli asteroidi alla crosta terrestre, Daly e Schultz hanno impiegato l'Ames Vertical Gun Range della NASA, in California, struttura dotata di un cannone appositamente realizzato per studiare in laboratorio le collisioni fra corpi rocciosi ad alta velocità. In particolare, i ricercatori hanno sparato proiettili delle dimensioni di una biglia con una composizione simile a quella degli asteroidi carboniosi, i più comuni e particolarmente ricchi di acqua, contro bersagli di pietra pomice, privi di acqua. Simulando le condizioni tipiche di velocità e di angolo di impatto che dovevano

trovarsi nel periodo in cui questi eventi erano più frequenti per il nostro pianeta, Daly e Schultz hanno scoperto che il 30 per cento dell'acqua dell'impattatore si trasferisce al bersaglio, rimanendo intrappolata come vapore acqueo nelle rocce fuse dal calore dell'impatto. Un meccanismo, questo, che potrebbe spiegare anche la presenza di acqua nel mantello lunare.

Emiliano Ricci



Quando l'entanglement è paradossale

Realizzando l'entanglement quantistico tra migliaia di atomi di rubidio-87, tre gruppi di ricerca hanno osservato per la prima volta in un sistema a molte particelle il «paradosso EPR», ovvero un esperimento mentale proposto da Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen (da cui le iniziali del paradosso). I tre gruppi, guidati rispettivamente da Matteo Fadel dell'Università di Basilea, Karsten Lange della Leibniz Universität di Hannover e Philipp Kunkel dell'Università di Heidelberg – hanno pubblicato i loro studi su «Science».
Il principio di indeterminazione di Heisenberg, uno dei capisaldi della meccanica quantistica, pone un limite alla precisione con cui è possibile prevedere contemporaneamente la misura di due grandezze fisiche. Tuttavia, nel 1935 Einstein, Podolsky e Rosen suggerirono un modo «paradossale» per aggirare quel limite sfruttando l'*entanglement*, ossia una correlazione a distanza che si può sviluppare tra sistemi quantistici. Se due sistemi A e B sono *entangled*, il risultato di una misurazione su A può essere usato per prevedere con certezza l'esito di una misurazione su B (senza avere accesso diretto a B, ed è qui che sta il paradosso). I tre gruppi sono riusciti a creare l'entanglement tra atomi di rubidio-87 raffreddati appena al di sopra dello zero assoluto: a queste temperature gli atomi formano un particolare stato della materia noto come «condensato di Bose-Einstein». «In questi sistemi le particelle sono indistinguibili: per renderle distinguibili abbiamo fatto espandere il gas di atomi, per poi fotografarli. Nell'immagine è possibile distinguere gli atomi poiché appaiono in punti diversi», ha spiegato Fadel. I ricercatori hanno poi verificato che il livello di entanglement tra gli atomi era tale da dimostrare il paradosso EPR. In particolare, il primo gruppo ha ottenuto circa 600 atomi entangled, il secondo 5000 e il terzo ben 11.000. «L'approccio sviluppato potrebbe trovare applicazioni pratiche nella misura di gradienti di campi elettromagnetici», ha sottolineato Fadel.

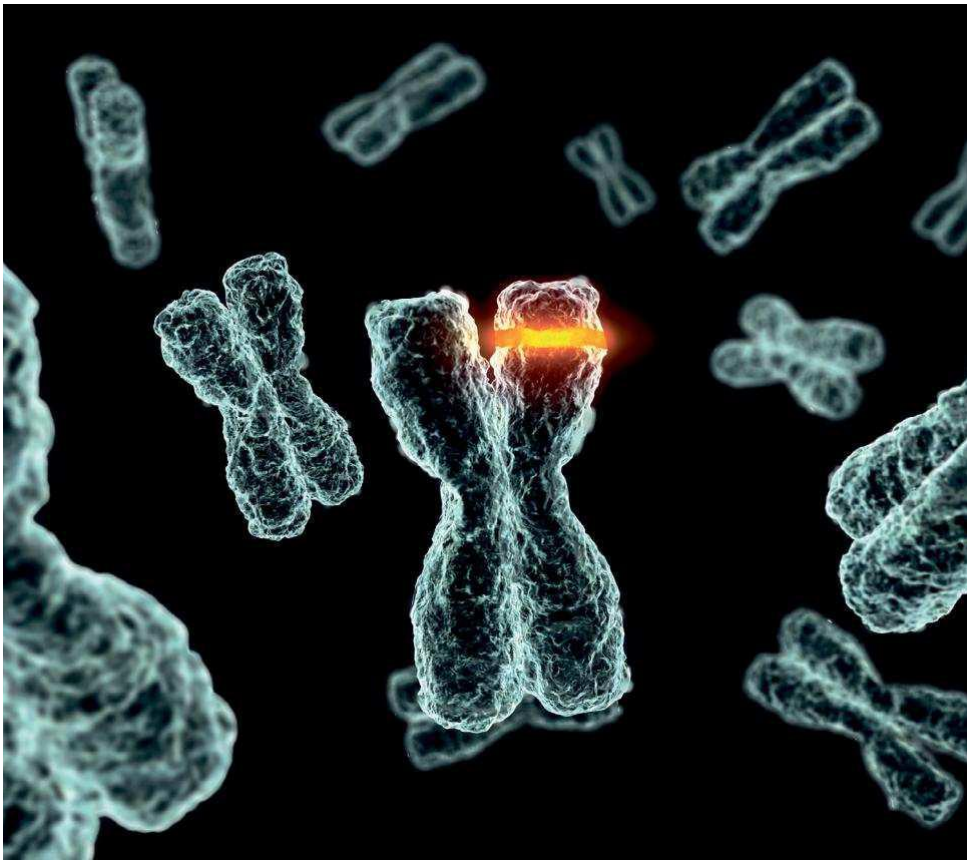
Matteo Serra

Cortesia NASA (*illustrazione asteroide*); cortesia Dipartimento di fisica dell'Università di Basilea (*illustrazione entanglement atomi di rubidio*)

BIOCHIMICA

Come è fatta la telomerasi

Ottenuta una risoluzione senza uguali della struttura di questo enzima che protegge i cromosomi



cdascher/iStock

A oltre trent'anni dalla sua scoperta, è stata finalmente chiarita la struttura della telomerasi, un enzima che protegge i cromosomi con ruoli importanti nella senescenza e nel cancro.

I telomeri sono le estremità dei cromosomi, e ogni volta che una cellula si divide si accorciano un po'. Nell'embrione, la telomerasi li ripara, mentre nella gran parte delle cellule adulte è poco attiva, così alla lunga i cromosomi si deteriorano e la cellula invecchia e smette di moltiplicarsi. Si ritiene che questo fenomeno ci protegga dal cancro e infatti in molti tumori la telomerasi si riattiva, favorendo la proliferazione sfrenata. Da anni quindi si cercano farmaci che attivino o blocchino la telomerasi, per contrastare aspetti della senescenza o il cancro. Ma finora senza esito, anche perché, per varie difficoltà tecniche, la struttura dell'enzima era nota solo in modo grossolano.

Eva Nogales e Kathleen Collins, dell'Università della California a Berkeley, grazie a una serie di accorgimenti e a tecniche perfezionate di microscopia crioelettronica, hanno presentato su «Nature» immagini tridimensionali di risoluzione quattro volte superiore alle precedenti (intorno a 0,7 nanometri). Così per la prima volta individuano tutti i componenti della telomerasi, mostrando che è composta da 11 subunità proteiche intorno a un filamento di RNA, e che funziona come monomero e non – come alcuni ipotizzavano – come dimero (cioè una molecola ottenuta dall'unione di due monomeri).

I ricercatori intendono aumentare ulteriormente il livello di dettaglio (per individuare i possibili bersagli farmacologici la risoluzione ottimale andrebbe raddoppiata), ma la struttura delineata consente già di orientare la ricerca dei farmaci e di chiarire aspetti importanti della sua funzione. Per esempio, Collins aveva scoperto una malattia causata da una mutazione della telomerasi, la discheratosi congenita, e ora è chiaro perché la mutazione è dannosa: una proteina componente della telomerasi, la discherina, è presente in due subunità legate fra loro, e la mutazione impedisce questo legame.

Giovanni Sabato

Una nuova forma di DNA nelle cellule

La struttura a doppia elica del DNA è nota a tutti. Ma pochi sanno che il DNA forma anche nodi a quattro filamenti, chiamati «i-motif». Come si legge su «Nature Chemistry», Mahdi Zeraati del Garvan Institute of Medical Research di Sidney, in Australia, e colleghi, li hanno osservati per la prima volta nel nucleo di cellule umane vive. Nei nodi, le lettere C (citosina) sullo stesso filamento di DNA si legano fra loro anziché appaiarsi con le G (guanine) del filamento opposto, come avviene nella struttura a doppia elica.
Gli i-motif erano già stati osservati e studiati in passato, ma solo *in vitro*, tanto che addirittura si dubitava della loro esistenza *in vivo*. Per scovarli, è stato sviluppato un anticorpo fluorescente in grado di legarsi in modo specifico a queste strutture elusive, che al microscopio appaiono come macchie verdi transitorie.
I ricercatori hanno dimostrato che gli i-motif si formano sia in alcune regioni promotrici del DNA, che controllano l'attivazione o lo spegnimento dei geni, sia nei telomeri, le estremità dei cromosomi coinvolte nell'invecchiamento. Questi nodi emergono soprattutto alla fine della cosiddetta fase G1 del ciclo cellulare, in cui il DNA è attivamente «letto». È possibile, quindi, che siano lì per aiutare a cambiare i geni o per influenzarne la lettura.

Eugenio Melotti

AMBIENTE

Sensibili all'anidride carbonica

Svelata la relazione tra la concentrazione di questo gas serra in atmosfera e la crescita delle piante

Le piante assorbono una parte dell'anidride carbonica che noi immettiamo in atmosfera. Tramite la fotosintesi, la CO_2 entra in queste piante e il suo carbonio contribuisce a formare tronchi, rami, foglie. È facile pensare, quindi, che in un mondo con più anidride carbonica le piante crescano di più. Ovviamente questo è vero solo a patto di considerare costanti le altre grandezze che contribuiscono alla loro crescita, come la temperatura e l'acqua disponibile.

In ogni caso, da tempo si effettuano esperimenti di campo per capire come potrebbero crescere le piante in un mondo con più CO_2. Finora, questi esperimenti erano durati pochi anni; oggi, invece, abbiamo un esperimento ultra-ventennale, di cui Peter Reich, dell'Università del Minnesota, e collaboratori hanno pubblicato i risultati in un numero recente di «Science».

I ricercatori hanno aumentato artificialmente la concentrazione di anidride carbonica in alcuni appezzamenti di terra nel Minnesota e hanno studiato la crescita di piante di tipo diverso. Ebbene, mentre nel breve periodo per tutte le piante si vede un aumento di crescita, più o meno elevato, dopo i primi 15 anni si assiste a una minore sensibilità all'aumento di CO_2 per alcune piante molto importanti, come grano, riso e specie da pascolo dei climi temperati, ma anche quercia e acero. Insomma, si trova una sorta di «saturazione» nella crescita in regimi di anidride carbonica aumentata che fa pensare a una minore efficacia di assorbimento di CO_2 dall'atmosfera sul lungo periodo. In questo senso, le stime di anidride carbonica presente in aria e dunque di riscaldamento globale futuro sembrano sottostimati nei modelli attuali, perché il potenziale di assorbimento futuro sarebbe minore di quello previsto oggi.

Questi risultati sono stati possibili solo con una serie di esperimenti e misurazioni attuate per un ventennio: fermandoci prima non avremmo visto questo effetto. Tutto questo mostra l'importanza di usufruire di strutture e finanziamenti per tempi lunghi, ben oltre quelli che sono assegnati solo sull'onda della contingenza.

Antonello Pasini

Pesci a rischio per il clima che cambia

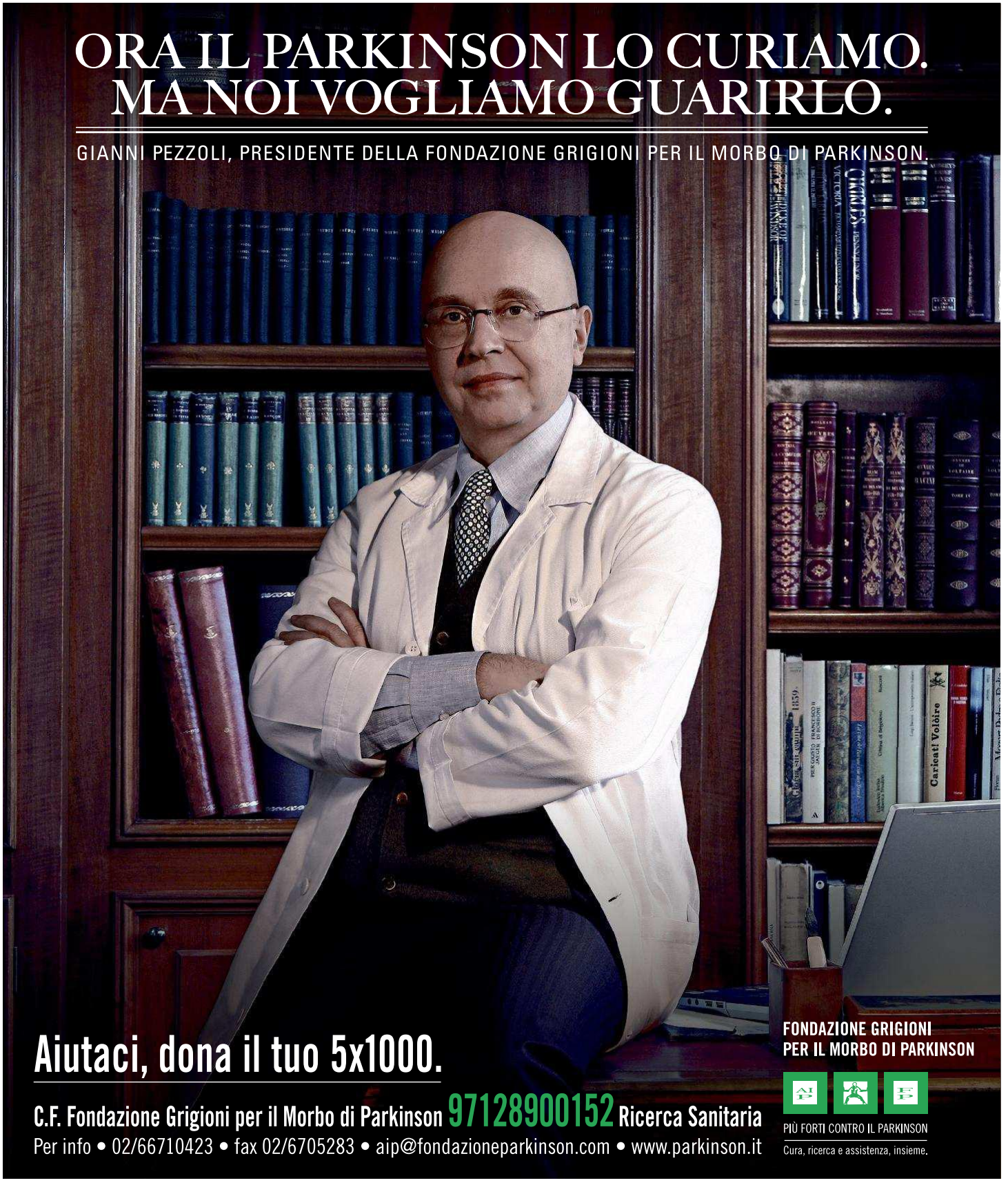
Nel 2300 in tutto il mondo gli stock ittici diminuiranno del 20 per cento. In alcune aree però la diminuzione sarà drammatica, per esempio nel Nord Atlantico, dove il calo sarà del 60. È la previsione poco rassicurante presentata da Jefferson Keith Moore dell'Università della California a Irvine e colleghi in uno studio su «Science». L'epicentro della crisi sarà l'Oceano Antartico, la causa il riscaldamento della Terra (agli attuali ritmi di emissione della CO_2 si stima che nel 2300 le temperature medie saliranno di 8 °C). L'Oceano Antartico è coinvolto perché è il motore principale del flusso globale di nutrienti come fosforo o potassio: le correnti li spingono in superficie e da lì agli altri oceani dove servono per la crescita del fitoplancton, fondamentale per la rete alimentare che nutre i pesci. Con l'aumento delle temperature, però, lo scioglimento dei ghiacci antartici porterà più luce in superficie e il fitoplancton ne approfitterà per fare più fotosintesi e proliferare. Questo significa che sequestrerà più nutrienti togliendoli alla disponibilità del fitoplancton di altri oceani, e a rimetterci saranno i pesci. Inoltre, un cambiamento nel flusso dei venti e delle correnti farà sì che più nutrienti rimarranno intrappolati in profondità dove non alimentano la produttività dei mari.

Martina Saporiti

primeimages/iStock

ORA IL PARKINSON LO CURIAMO. MA NOI VOGLIAMO GUARIRLO.

GIANNI PEZZOLI, PRESIDENTE DELLA FONDAZIONE GRIGIONI PER IL MORBO DI PARKINSON.



Aiutaci, dona il tuo 5x1000.

C.F. Fondazione Grigioni per il Morbo di Parkinson 97128900152 Ricerca Sanitaria

Per info • 02/66710423 • fax 02/6705283 • aip@fondazioneparkinson.com • www.parkinson.it

FONDAZIONE GRIGIONI PER IL MORBO DI PARKINSON

PIÙ FORTI CONTRO IL PARKINSON

Cura, ricerca e assistenza, insieme.

Il Parkinson è una delle malattie neurodegenerative più frequenti nel mondo. Dati recenti indicano che il numero di pazienti è triplicato negli ultimi trent'anni specie in nazioni come l'Italia con un'aspettativa di vita molto lunga ed ora siamo vicini ad un caso su cento persone. La terapia attuale riesce a compensare bene i pazienti nei primi 5-10 anni, poi subentrano fenomeni di fluttuazione sui sintomi che abbassano di molto la qualità di vita dei pazienti. L'Associazione Italiana Parkinsoniani e la Fondazione Grigioni per il Morbo di Parkinson rappresentano un esempio di eccellenza nella collaborazione pubblico e privato no-profit. Finalmente le grandi casistiche dei maggiori centri italiani sono valorizzate da risorse per la ricerca di qualità. Sono nate in questi anni banche genetiche e di tessuti, enormi banche dati che stanno producendo risultati di grande rilevanza e pongono le basi per arrivare presto a sconfiggere la malattia. **INFO: 0266713111 aip@fondazioneparkinson.com - www.parkinson.it**

BIOLOGIA DELLO SVILUPPO

La vita, cellula dopo cellula

Ricostruito il percorso dall'ovocita fecondato all'organismo completo

La scoperta è di quelle che lasceranno il segno: per la prima volta è stata codificata la «ricetta genetica» che permette a una cellula uovo di differenziarsi e di dare origine a un organismo completo. Il risultato è stato possibile grazie agli sforzi di scienziati della Harvard Medical School e della Harvard University che, con ben tre ricerche pubblicate contemporaneamente su «Science», sono riusciti a individuare tutta la sequenza di segnali biologici che dà alla singola cellula le istruzioni per generarne altre, nel momento giusto e nel modo e nei tempi giusti.

Oggetto delle ricerche sono stati due organismi modello tipicamente usati nei laboratori di tutto il mondo, il pesce zebra (*Danio rerio*) e la rana *Xenopus tropicalis*, il cui sviluppo è stato codificato, cellula per cellula, grazie a una innovativa tecnica di sequenziamento messa a punto alla stessa Harvard Medical School, con cui è stato possibile profilare la successione delle espressioni geniche di oltre 250.000 cellule delle due specie nell'arco di 12, 17 e 24 ore.

I ricercatori di Harvard prevedono che con questo metodo un giorno sarà possibile ricostruire qualsiasi processo biologico complesso in cui si verifichi un cambiamento di espressione genica. In particolare, le applicazioni della scoperta sono assai promettenti non solo per la comprensione in dettaglio dello sviluppo embrionale, ma anche dei cambiamenti che avvengono nelle cellule tumorali o in quelle colpite da neurodegenerazione.

Gli esperimenti, comunque, hanno già fornito alcuni risultati importanti e concreti. Per esempio, gli scienziati sono rimasti sorpresi nel constatare che in molti casi la sequenza del DNA di un gene, e la struttura della corrispondente proteina per cui codifica quel DNA, può essere praticamente identica per pesce zebra e *X. tropicalis*, ma avere una codifica di espressione (*pattern*) diversa. «Questo – spiega il professor Allon Klein, dell' Harvard Medical School, coautore di due dei tre articoli – rappresenta una vera e propria sfida all'idea stessa che abbiamo di tipologia di cellula».

Marina Semiglia

Nuovi rischi dal virus della mononucleosi

Il virus di Epstein-Barr (EBV), che causa la mononucleosi, aumenta anche il rischio di sviluppare almeno altre sette malattie: lupus eritematoso sistemico, sclerosi multipla, artrite reumatoide, artrite idiopatica giovanile, malattia infiammatoria cronica intestinale, celiachia e diabete di tipo 1. Lo rivela uno studio pubblicato su «Nature Genetics» da John B. Harley del Children's Hospital Medical Center di Cincinnati e colleghi secondo cui una proteina prodotta dal virus si lega a regioni del genoma associate a queste malattie, alterando attivazione e disattivazione di geni.

EBV è un virus molto comune, ancora senza vaccino, che si diffonde attraverso la saliva e resta nel genoma dei linfociti B, cellule del sistema immunitario, per tutta la vita. Finora, gli scienziati sospettavano solo che EBV avesse un legame con alcune condizioni rare, tra cui alcuni tumori del sistema linfatico e il lupus eritematoso sistemico. Il nuovo studio, che ha sfruttato tecniche genomiche impensabili dieci anni fa, conferma lo zampino del virus nell'insorgenza del lupus, e lo associa ad altre sei malattie, rendendo urgente l'adozione di nuove terapie e misure preventive.

Eugenio Melotti

David McCarthy/AGF/SPL (*embrione di pesce zebra*); CNRI/SPL (*virus Epstein-Barr*)

EVOLUZIONE

Gli svantaggi del dimorfismo sessuale

Quando le differenze morfologiche tra i sessi sono eccessive, la specie rischia l'estinzione

Ashley Cooper/Getty Images

Come in tutti gli eccessi, anche nella selezione sessuale il troppo stroppia, tanto da mettere a rischio la sopravvivenza stessa della specie. La conclusione è di Maria João Fernandes Martins e Gene Hunt, paleontologi della Smithsonian Institution, che insieme a colleghi di altri istituti statunitensi hanno pubblicato su «Nature» i risultati di un'analisi su piccoli crostacei fossili.

La differenza morfologica tra individui di sesso opposto è ritenuta un elemento chiave della selezione sessuale poiché esaspera la competizione tra i maschi, migliorando di conseguenza il successo della specie. Tuttavia, lo sviluppo e il mantenimento di code appariscenti come quelle del pavone o di palchi maestosi come nei cervi, due esempi spettacolari di dimorfismo sessuale, hanno un costo imponente, e in alcuni casi questo dispendio di energie può intaccare le risorse destinate alla cura del partner e della prole, soprattutto in un ambiente che cambia.

Per capire quando gli svantaggi finiscono per superare i benefici, i ricercatori dovevano però individuare tra le specie estinte quelle in cui il dimorfismo fosse evidente. Il loro studio si è basato sugli ostracodi, una classe di crostacei di grande successo le cui prime testimonianze fossili risalgono a quasi 500 milioni di anni fa.

Tra gli ostracodi, il dimorfismo si basa soprattutto sulle dimensioni e sulla forma del carapace dei maschi, generalmente di tipo allungato per ospitare organi sessuali più o meno sviluppati. Tra le 93 specie considerate, vissute nel Cretacico superiore tra 66 e 84 milioni di anni fa, gli autori hanno osservato che quelle con un marcato dimorfismo sessuale erano caratterizzate da tassi di estinzione molto più elevati, fino a dieci volte maggiori rispetto a quelle in cui le differenze tra i generi erano poco pronunciate.

Se confermata da altri studi, l'ipotesi potrebbe influenzare le attuali strategie di conservazione delle specie a rischio di estinzione: «Se in passato destinare tante energie alla riproduzione ha reso più difficile l'adattamento delle specie a circostanze mutevoli, lo stesso potrebbe valere per quelle odierne», ha ipotizzato Hunt.

Davide Michielin

L'odore della malaria

I parassiti del genere *Plasmodium* responsabili della malaria cambiano l'odore dei loro ospiti rendendoli più attraenti alle *Anopheles*, le zanzare che pungendo le persone infette assicurano la diffusione della malattia. Il profumo dei malati è così gradito agli insetti per via di composti chiamati aldeidi: lo prova uno studio pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» da Ailie Robinson della London School of Hygiene and Tropical Medicine e colleghi. I ricercatori hanno «raccolto» 117 campioni dell'odore di 56 studenti kenioti, sia malati sia sani, mettendogli buste di plastica attorno ai polpacci. I componenti dei campioni sono stati separati e testati uno per uno mettendo elettrodi sulle antenne delle zanzare (l'equivalente dei nostri nasi): a «eccitarle» erano soprattutto le aldeidi, molecole molto abbondanti nei campioni prelevati dai malati. Non si sa come il plasmodio cambi odore ai malati (forse è lui a «profumare» di aldeidi o forse i composti si formano dalla rottura delle cellule adipose in seguito all'infezione), ma questo trucco potrebbe essere usato a suo svantaggio per combattere proprio la malattia che causa, per esempio costruendo trappole odorose che catturino le zanzare prima che succhino sangue infetto e contribuiscano a diffondere i parassiti.

Martina Saporiti

L'emicrania per adattarsi al freddo

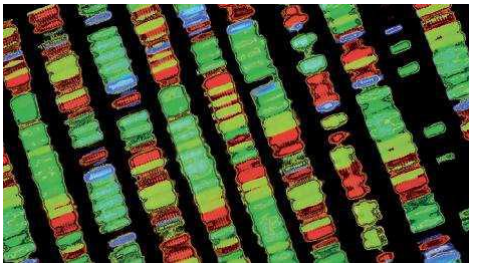
Una variante genetica collegata all'emicrania potrebbe essere stata selezionata dall'evoluzione per favorire l'adattamento al freddo dei nostri antenati che lasciarono l'Africa per migrare verso latitudini settentrionali. Lo rivela uno studio su «PLOS Genetics», in cui Felix M. Key del Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie e colleghi hanno dimostrato che la variante di una piccola sequenza di DNA a monte del gene *TRPM8*, che codifica per l'unica proteina nota coinvolta nella risposta dell'organismo alle basse temperature, è diventata sempre più comune fra le popolazioni umane che negli ultimi 25.000 anni si sono spostate a nord.
Come risulta da una combinazione di analisi genetiche, la mutazione, già associata da studi precedenti a un rischio maggiore di emicrania, è molto frequente nel genoma delle popolazioni che vivono a latitudini elevate e rara invece nel genoma delle popolazioni africane. L'ipotesi dei ricercatori è che la nuova variante sia comparsa in Africa già prima dell'inizio delle migrazioni, tuttavia si sarebbe distribuita in base alla latitudine solo fuori dal continente africano, spiegando così in parte la diversa suscettibilità all'emicrania che caratterizza i gruppi umani attuali. (**SaMo**)

Il problema della massa ordinaria mancante

Il bilancio è noto: di tutta la materia-energia dell'universo, solo il cinque per cento è composto da materia ordinaria. Del restante 95 per cento sappiamo poco, se non che dobbiamo invocarlo per spiegare i moti delle galassie (materia oscura, 27 per cento) e l'espansione accelerata del cosmo (energia oscura, 68 per cento). Il problema, però, è che anche gran parte della materia ordinaria non è luminosa e si nasconde ancora alla vista. Si stima infatti che meno del dieci per cento sia visibile sotto forma di stelle o di gas caldo.

Un'ipotesi è che sia diffusa come mezzo intergalattico, soprattutto attorno alle galassie, estendendosi oltre gli aloni di materia oscura. Per valutare questa teoria, un gruppo di astronomi guidato da Jiang-Tao Li, dell'Università del Michigan, ha ideato una tecnica di composizione delle immagini nei raggi X raccolte dal telescopio spaziale XMM-Newton dell'Agenzia spaziale europea, in modo da evidenziare la presenza del mezzo circumgalattico anche attorno a galassie lontane. Come scrivono su «The Astrophysical Journal Letters», il gas caldo, tenuissimo, c'è e si vede, ma non è ancora in quantità sufficiente per spiegare tutta la materia ordinaria. Occorre quindi cercare meglio, o altrove, magari non solo nella forma di gas caldo e tenue degli aloni galattici, ma anche nella materia fredda e densa. (**EmRi**)

Tutti i genomi del mondo

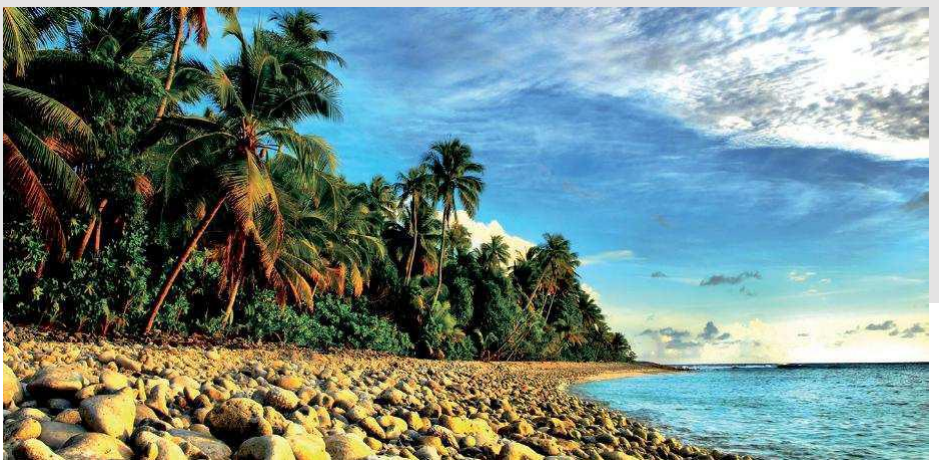


Il progetto è a dir poco ambizioso: sequenziare, catalogare e analizzare il genoma di tutti gli eucarioti. Costo previsto: 4,7 miliardi di dollari; tempo necessario: dieci anni; impatto sull'umanità: inestimabile. Il dominio degli eucarioti, tutti gli organismi le cui cellule sono dotate di un nucleo contenente DNA e delimitato da una membrana, si ritiene comprenda tra 10 e 15 milioni di specie (quasi il 90 per cento non ancora scoperte); finora però quelle di cui sono stati sequenziati i genomi sono solo poco più di 15.000.

L'impresa permetterà innanzitutto di capire meglio come poter salvaguardare la biodiversità, ma avrà ricadute importanti in ogni campo della ricerca, dalla medicina all'agricoltura alle biotecnologie. L'Earth BioGenome Project, presentato su «Proceedings of the National Academy of Sciences» da un gruppo internazionale di 24 scienziati, mira anche a promuovere la messa a punto di protocolli comuni per la conservazione e la condivisione dei dati. (**MaSe**)

La scarsità di acqua potabile che minaccia gli atolli

Le lancette dell'orologio che scandisce la crisi climatica delle nazioni oceaniche si muovono più in fretta del previsto. Sebbene la maggioranza degli scenari finora elaborati preveda che l'innalzamento del livello del mare minaccerà la sopravvivenza degli atolli solo verso la fine del secolo, la maggior parte di queste isole dalla caratteristica forma circolare potrebbe diventare inabitabile già nei prossimi decenni. A sostenerlo è uno studio coordinato dal geologo Curt Storlazzi dello United States Geological Survey e pubblicato su «Science Advances». I ricercatori hanno monitorato per quasi due anni l'aumento delle mareggiate nelle Isole Marshall, a nord-est delle coste australiane, sviluppando modelli previsionali delle conseguenze su infrastrutture e disponibilità di acqua dolce. Poiché la maggioranza degli atolli ha un'altitudine di pochi metri sul livello del mare, la principale fonte di approvvigionamento di acqua potabile è costituita dalle precipitazioni, le quali, giunte al suolo, formano un sottile strato che sovrasta l'onnipresente ma più densa acqua salata. Secondo i ricercatori, l'aumento di intensità e frequenza delle mareggiate provocherà il continuo rimescolamento dei due strati, intaccando le riserve di acqua potabile, la cui perdita renderebbe difficile l'insediamento umano negli atolli già tra il 2030 e il 2060. (**DaMi**)



Shilo Watts/iStock (*atolla*); BSIP/AGF (*emicrania*); iStock (*genoma*); iStock (*diamante*)

Censimento per gorilla

Cinquantaquattro ricercatori diretti da Samantha Strindberg della Wildlife Conservation Society, per dieci anni hanno camminato nelle foreste dell'Africa occidentale per un totale di 8700 chilometri con l'obiettivo di contare ogni indizio della presenza di gorilla e scimpanzé, come giacigli notturni sugli alberi o feci. I risultati dello studio, pubblicati su «Science Advances», sono sia positivi sia preoccupanti: la popolazione di gorilla di pianura (360.000 esemplari stimati) e di scimpanzé (130.000) è di un terzo più grande di quanto pensato; al tempo stesso, però, fra inizio e fine della ricerca, c'è stato un calo nel numero di gorilla di circa il 2,6 per cento all'anno.

L'80 per cento dei gorilla vive fuori da parchi e riserve e a provocarne il calo sono sia il bracconaggio sia la diffusione del virus Ebola. I risultati della ricerca sottolineano quindi l'importanza di educare le popolazioni vicine alle aree protette a non cacciare i grandi primati, per preservare sia gli animali sia la salute stessa dei locali. (**AlSa**)

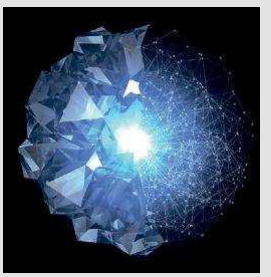
Lo stato «duale» dell'elettrone

Un bizzarro stato in cui un elettrone non è né intrappolato, né completamente libero dal suo atomo di appartenenza. Lo ha scoperto un gruppo internazionale di fisici guidato da Mary Matthews dell'Università di Ginevra. Il risultato, pubblicato su «Nature Physics» conferma un'ipotesi formulata oltre cinquant'anni fa dal fisico teorico Walter Henneberger.

Per ionizzare un atomo – ossia per strappare un elettrone dalla forza di attrazione del nucleo – è necessario sottoporre l'elettrone a un intenso campo elettrico (generato per esempio da un laser), opposto a quello generato dal nucleo. Se però il campo prodotto dal laser è calibrato in modo opportuno, teoricamente è possibile mantenere l'elettrone nei pressi del nucleo, evitando che sfugga del tutto. Dopo decenni di tentativi, Matthews e colleghi sono finalmente riusciti a dimostrarlo sperimentalmente, grazie a una scoperta sorprendente: aumentando l'intensità del laser oltre un certo valore limite (detto «valle della morte»), non è più possibile ionizzare l'atomo, ed è quindi possibile avere il controllo dell'elettrone senza rischiare che sfugga. Inoltre, i ricercatori hanno scoperto che in questo stato gli elettroni possono amplificare la luce, aprendo nuovi interessanti scenari nello studio della fisica dei laser. (**MaSe**)

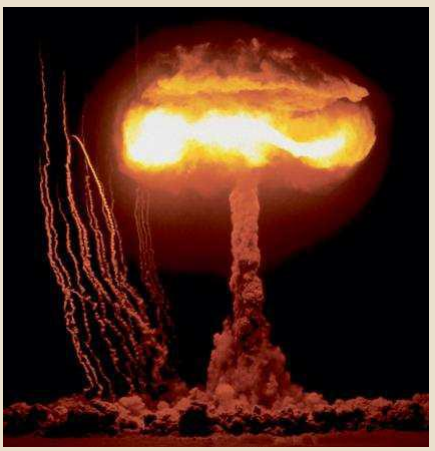
Diamanti da un pianeta del passato

Nel 2008, il meteorite Almahata Sitta è caduto nel deserto di Nubia, in Sudan. Si trattava di una urelite, rara tipologia di meteorite rocciosa che i planetologi sospettarono avesse un'origine «esotica»: si sarebbe staccata da un pianeta primitivo in orbita attorno al Sole circa 4,5 miliardi di anni fa, prima della formazione del sistema solare che conosciamo oggi. Il sospetto è diventato certezza quando Farhang Nabiei dell' Ecole Polytechnique Fédérale di Losanna, in Svizzera, e colleghi hanno analizzato i diamanti inglobati in



Almahata Sitta. Come si legge su «Nature Communications», sono diversi da quelli che si trovano nelle meteoriti più comuni: sono eccezionalmente grandi e contengono «impurità» nella forma di inclusioni di cromiti, solfuri e fosfati. Queste caratteristiche fanno pensare che i diamanti si siano formati a pressioni elevatissime, superiori a 20 gigapascal, possibili solo all'interno di corpi celesti grandi quanto Mercurio o Marte. Intrappolati nei detriti rocciosi liberatisi nell'urto di questo pianeta primitivo con un altro – un tipo di collisione frequente nel passato e da cui hanno avuto origine i pianeti del sistema solare – i diamanti hanno vagato per miliardi di anni nello spazio prima di cadere sulla Terra. (**MaSa**)

Come verificare le testate nucleari



Finora i trattati di disarmo nucleare hanno puntato sulla distruzione di missili e bombardieri più che delle testate, perché i vettori sono un buon indice delle capacità di attacco, mentre è difficile dimostrare a un ispettore che si sta distruggendo una vera testata – e non un falso, simile per aspetto e per emissioni radioattive – senza rivelare troppo su come è fatta. In particolare, il mix di isotopi del materiale fissile e la forma della cavità che lo ospita proverebbero che si tratta di una vera bomba, ma sono top-secret. Areg Danagoulian, del Massachusetts Institute of Technology, propone ora su «Nature Communications» e sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» due diverse varianti di una tecnica per risolvere il dilemma. Il principio è quello della crittografia: i dati criptati sono indecifrabili senza la chiave, ma si può comunque verificare se due set di dati incomprensibili sono identici o meno. Danagoulian ha sviluppato un protocollo per combinare i dati su composizione e geometria del dispositivo da esaminare con quelli generati da un mix di isotopi ignoto all'ispettore, e analizzare il risultato così da capire se corrisponde o meno a quello ricavato da una vera bomba. In simulazioni approfondite il principio si è mostrato efficace e a prova di frodi, e attende ora una verifica in condizioni reali. (**GiSa**)

iStock (*gorilla*); Getty Images (*bomba atomica*); Devrimb/iStock ()

L'Osservatorio Parkes, un radiotelescopio in Australia, ha compiuto il primo rilevamento di un misterioso lampo radio veloce proveniente dall'universo lontano.

Lampi nella notte

Gli astronomi cercano di chiarire che cosa provoca potenti lampi di luce radio nel cosmo remoto

di Duncan Lorimer e Maura McLaughlin

Un giorno a inizio 2007 è venuto da noi David Narkevic, uno studente universitario, per riferirci un fatto. Studiava fisica alla West Virginia University, dove avevamo appena iniziato il nostro primo anno come *assistant professor*. L'avevamo incaricato di ispezionare le osservazioni d'archivio delle Nubi di Magellano, piccole galassie satellite della Via Lattea a circa 200.000 anni luce di distanza dalla Terra. Narkevic ha un modo di fare molto pacato, e quel giorno non aveva fatto eccezione. «Ho trovato qualcosa che sembra abbastanza interessante», aveva detto con distacco, mostrandoci il grafico di un segnale che era oltre 100 volte più intenso rispetto al rumore di fondo degli impianti elettronici del telescopio. Sulle prime sembrava che avesse identificato proprio quello che stavamo cercando: un tipo di stella piccolissima e luminosa, una pulsar.

Robert B. Goodman/Getty Images

IN BREVE

Uno strano lampo di «luce» radio proveniente dal cosmo remoto ha sconcertato gli scienziati, quando l'hanno rilevato nel 2007.

Gli astronomi hanno dubitato che il lampo provenisse dal cielo fino a quando non hanno trovato esplosioni simili, dette «lampi radio veloci».

È in corso la ricerca di altri eventi di questi strani fenomeni e l'identificazione di quello che li provoca.

Fra le teorie sulle fonti ci sono stelle compatte, supernove e addirittura possibilità esotiche come le stringhe cosmiche.

Queste stelle dense e magnetiche emettono fasci di luce mentre ruotano, dando l'impressione che la stella abbia «pulsazioni», come un faro. All'epoca si conoscevano circa 2000 pulsar, e noi davamo la caccia a quelle lontane e particolarmente luminose. La ricerca si basava sul software che una di noi (McLaughlin) e il suo relatore avevano sviluppato per cercare singoli impulsi nelle osservazioni radio. Il programma doveva rendere conto di un effetto chiamato dispersione degli impulsi, che funziona così: mentre le onde radio viaggiano nello spazio, gli elettroni liberi che si muovono nel mezzo interstellare disperdono le onde proprio come un prisma disperde la luce. Gli elettroni liberi agiscono come un plasma attraverso cui le onde radio con frequenza più elevata viaggiano più velocemente e arrivano al telescopio prima delle onde a frequenza inferiore. Tanto più una sorgente è lontana dalla Terra, tanti più elettroni le onde radio incontrano lungo il viaggio, con un conseguente ritardo più grande tra le onde radio ad alta e a bassa frequenza. Dato che non sapevamo a che distanza potessero essere le nuove pulsar, il programma analizzava i dati in cerca di segnali che potessero presentare molte diverse entità della dispersione – dette «misure di dispersione», o DM – in modo da essere sicuri di catturare le pulsar su varie possibili distanze.

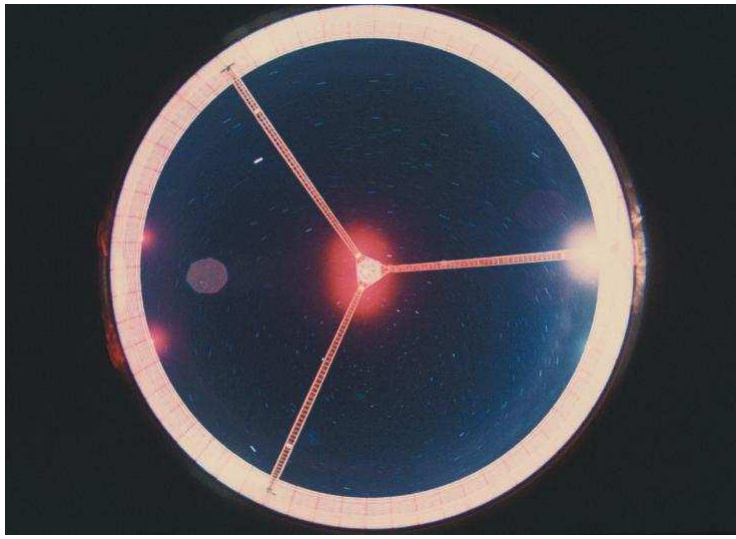
Al momento della scoperta Narkevic stava analizzando osservazioni effettuate cinque anni prima dal radiotelescopio Parkes in Australia, che può ispezionare vaste aree rapidamente osservando simultaneamente 13 posizioni sul cielo, chiamate fasci. Narkevic esaminava visivamente i segnali rilevati dal programma per eliminarne quel 99 per cento che non era nient'altro che rumore o interferenze provocate dall'uomo. Il segnale che trovò dava da pensare, non solo perché era tanto luminoso, ma anche perché proveniva da una regione di cielo qualche grado a sud della Piccola Nube di Magellano, dove non ci aspettavamo che ci fossero pulsar associate alla galassia nana. Sorprendentemente il segnale aveva un DM molto elevato, molte volte superiore a quello che ci si aspetterebbe da un oggetto nella Via Lattea e la metà in più del previsto anche se fosse associato alla Piccola Nube di Magellano. Tutto questo suggeriva che la fonte doveva essere a 3 miliardi di anni luce di distanza, ben oltre il nostro gruppo locale di galassie.

Se il segnale proveniva davvero da un punto così lontano, allora era stato emesso prima della comparsa dei dinosauri. La velocità finita della luce e la breve durata del segnale ci dicono che non può provenire da qualcosa di più grande di 10 millisecondi-luce, cioè circa 3000 chilometri, assai meno di 1,4 milioni di chilometri, il diametro del Sole. Sebbene una pulsar possa rientrare in queste dimensioni, la quantità di energia emessa sarebbe stata più grande di quella che il Sole emette in un mese, e oltre un miliardo di volte in più rispetto agli impulsi delle pulsar più luminose.

Che tipo di oggetto potrebbe essere responsabile di uno spettacolo simile? La nostra prima priorità è stata stabilire se l'impulso potesse essere prodotto da interferenze provocate dall'uomo. A differenza dei lampi delle pulsar, questo non sembrava ripetersi; abbiamo trovato un unico impulso nelle circa due ore di osservazione. Un'analisi più approfondita, però, ha rivelato che i tempi di arrivo delle varie frequenze dell'impulso seguivano il modello previsto per la dispersione interstellare, una coincidenza molto improbabile per un'interferenza. Un'ulteriore prova del fatto che questo lampo fosse astrofisico e non dovuto a un segnale radio creato dall'uomo era che sembrava originarsi da un singolo punto nel cielo. Si è mostrato con la massima luminosità in uno dei 13 fasci del ricevitore Parkes, mentre altri tre l'hanno rilevato più debolmente: proprio quello che ci aspetteremmo da un segnale celestiale. Le interferenze umane vicine, invece, appaiono in genere in tutti e 13 i fasci.

Duncan Lorimer è professore di fisica e astronomia al Center for Gravitational Waves and Cosmology della West Virginia University. I suoi interessi di ricerca si concentrano principalmente sulla popolazione delle pulsar e dei lampi radio veloci.

Maura McLaughlin è astronoma alla West Virginia University. I suoi principali interessi di ricerca sono le stelle di neutroni e la loro struttura. Attualmente presiede il North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves, che mira a usare le pulsar per rilevare le onde gravitazionali.



Guardando verso il cielo dal piatto dell'Osservatorio Parkes, si osserva una distesa di stelle. Dopo la scoperta iniziale del lampo di Lorimer, Parkes ha rilevato diversi altri lampi radio veloci.

Sembrava che Narkevic si fosse imbattuto in qualcosa di nuovo, un segnale cosmico su cui si sarebbero concentrate le nostre ricerche e che avrebbe perplesso la comunità astronomica. Abbiamo ipotizzato che questo strano segnale potesse non essere l'unico nel suo genere. In base a durata e campo visivo delle osservazioni di Parkes abbiamo stimato che ogni giorno potessero passare per il cielo centinaia di lampi radio di simile luminosità, senza che nessuno se ne accorga. Nel 2007 abbiamo pubblicato un articolo in cui affermavamo che questo evento era il prototipo di una nuova popolazione di sorgenti radio di origine sconosciuta. Abbiamo teorizzato che se fossimo riusciti a identificarle e capirle avremmo saputo di più su un nuovo tipo di evento cosmico, e avremmo anche potuto stimare le loro distanze con misurazioni di dispersione e usarle per un progetto grandioso come mappare la struttura su larga scala dell'universo. Ma per prima cosa dovevamo dimostrare che il lampo era reale, un'impresa che avrebbe portato a svolte sorprendenti e sarebbe quasi finita con una ritirata.

Verità o fantasia?

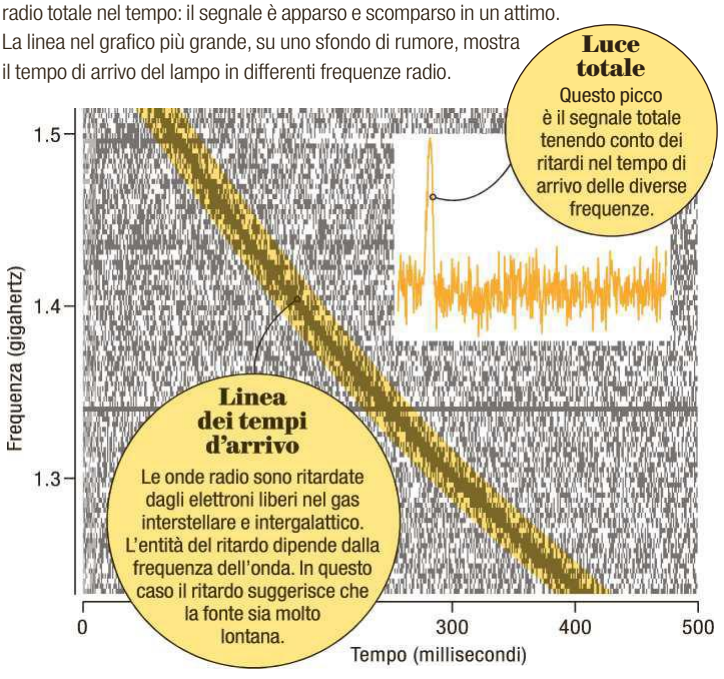
All'inizio altri ricercatori furono incuriositi dalla nostra scoperta – presto soprannominata «lampo di Lorimer» – e iniziarono a proporre modi per spiegarne l'origine e a cercarne altre simili.

Poco tempo dopo la nostra scoperta, Matthew Bailes della

Roger Ressmeyer/Getty Images

Il primo lampo

Questo sorprendente segnale, scoperto nel 2007 e chiamato «lampo di Lorimer», è sembrato un segnale cosmico di tipo sconosciuto. Il riquadro mostra la luminosità della luce radio totale nel tempo: il segnale è apparso e scomparso in un attimo. La linea nel grafico più grande, su uno sfondo di rumore, mostra il tempo di arrivo del lampo in differenti frequenze radio.



Infografica di Amanda Montañez; fonte: Duncan Lorimer

Swinburne University of Technology di Melbourne, uno dei coautori del nostro articolo, osservò il settore di cielo del lampo di Lorimer per 90 ore usando il telescopio Parkes, ma non trovò prove di altri lampi. Quella osservazione era stata effettuata necessariamente sei anni dopo l'osservazione d'archivio che aveva mostrato il lampo originale, quindi non si poteva escludere la possibilità di altri lampi su scale temporali di ore o persino anni attorno all'osservazione originale.

Quindi Bailes e la sua allora dottoranda, Sarah Burke-Spolaor, condussero una nuova ricerca usando altri dati di archivio di Parkes ma in una zona diversa del cielo. In un articolo pubblicato nel 2010 hanno riferito la scoperta di 16 eventi con molte caratteristiche in comune con il lampo di Lorimer; alcuni avevano DM quasi identici e durate e forme d'impulso simili. C'era però una differenza significativa: ognuno di questi lampi appena scoperti appariva in tutti e 13 i fasci del ricevitore Parkes, suggerendo fortemente che non potessero essere associati a una fonte nello spazio. Invece dovevano aver avuto origine dal suolo o dall'atmosfera, per esempio da un fulmine. In riferimento alla natura dissimulatrice di questi segnali, Burke-Spolaor e Bailes li hanno soprannominati «pèriti», come i mitici cervi alati che proiettano un'ombra umana, descritti dallo scrittore argentino Jorge Luis Borges.

La scoperta dei pèriti ha fatto nascere molto scetticismo nei confronti del lampo di Lorimer. Visto che le successive osservazioni radio non sono riuscite a catturare ulteriori lampi, la maggior parte degli astronomi ha iniziato a sospettare che anche quello di Lorimer fosse un pèrito. Il numero di articoli sulla natura del segnale iniziò a calare. A una conferenza del 2011 ci fu persino una conta per alzata di mano per vedere che percentuale del pubblico credesse alla realtà del lampo di Lorimer. Uno di noi (Lorimer), seduto in prima fila, non ha osato girarsi verso il resto del pubblico per vedere il risultato del sondaggio!

Quattro anni dopo il primo rilevamento, McLaughlin, insieme a un postdoc e a un laureando, ha studiato un ampio insieme di dati radio sulle pulsar in cerca di altri lampi, ma non avendo trovato niente di simile ha cominciato anche lei a dubitare del lampo di Lorimer. Con i suoi collaboratori ha addirittura scritto un articolo secondo cui era improbabile che si trattasse di un evento astrofisico, una conclusione che ora è imbarazzante.

Ma all'incirca in quel periodo si verificarono vari fatti incoraggianti. Il primo evento promettente arrivò nel 2012, quando Evan Keane, ora alla Square Kilometer Array Organisation, con sede a Manchester, nel Regno Unito, scoprì un altro lampo nei dati archivistici di Parkes. Nel frattempo, sotto la direzione di Bailes, erano state apportate migliorie al telescopio Parkes, aggiungendo strumenti digitali all'avanguardia e dandogli una sensibilità senza precedenti ai lampi altamente dispersi. La passione di Bailes ha avuto i suoi risultati: nel 2013 i ricercatori hanno trovato altri quattro lampi con un'ampia varietà di DM in un nuovo insieme di dati di Parkes. Nell'articolo che ha presentato i primi risultati di queste osservazioni, guidate dal dottorando Dan Thornton, allora all'Università di Manchester, gli scienziati descrivevano gli eventi come lampi radio veloci (*fast radio burst*, FRB), per via della loro breve durata. Ma soprattutto, a differenza dei pèriti, questi quattro lampi sono stati rilevati in un solo fascio, rendendoli coerenti con un'origine astronomica anziché con un'interferenza terrestre.

Grazie a queste scoperte la natura astrofisica degli FRB si è fatta sempre più certa. Un momento di sollievo e buonumore è arrivato con un articolo del 2015 di Emily Petroff, allora a Swinburne, e colleghi, che hanno dimostrato che i pèriti di Parkes si verificavano prevalentemente attorno all'ora di pranzo, quando gli astronomi impazienti aprivano il forno a microonde prima che fosse spento del tutto. È stato un grande sollievo verificare che né l'orario del lampo di Lorimer né quelli degli altri FRB si sovrapponevano alle abitudini degli scienziati affamati.

Lampi a ripetizione

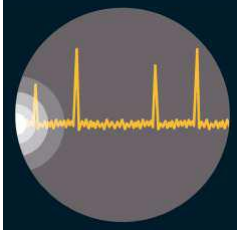
Ben presto, grazie a ricerche mirate con numerosi telescopi da parte di una crescente comunità di ricercatori, sono apparsi altri avvistamenti di FRB. Il Green Bank Telescope, in West Virginia, ne ha catturato uno in una diversa gamma di frequenze dello spettro radio rispetto al lampo di Lorimer, fornendo ulteriori prove che il segnale fosse reale, non prodotto da qualche peculiarità dei ricevitori sintonizzati sulla banda di frequenze originaria.

Il mistero si è infittito nel 2016, quando una squadra guidata da Laura Spitler, del Max-Planck-Institut für Radioastronomie di Bonn, in Germania, ha riferito la rilevazione di lampi ripetuti in un evento originariamente osservato da dati acquisiti nel 2012 all'Osservatorio di Arecibo a Puerto Rico. Fino ad allora gli astronomi avevano generalmente concluso che si trattasse di eventi *una tantum*. Circa tre anni dopo la rilevazione originale, nota come FRB

FONTI IPOTETICHE

Possibili responsabili

Ci sono diverse teorie su che cosa possa aver causato il lampo di Lorimer e simili fenomeni chiamati «lampi radio veloci» (FRB). Le possibilità vanno da versioni potenti di normali fenomeni astronomici come le supernove a esotici fenomeni teorici come le stringhe cosmiche. C'è almeno un FRB che si ripete e che quindi deve essere provocato da una fonte duratura, ma altri potrebbero essere eventi occasionali.

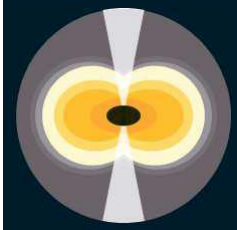


Gigantesca stella di neutroni pulsante

Le stelle di neutroni, resti densi di stelle morte, emettono luce in fasci rotanti che sembrano pulsare mentre la stella ruota. Una stella di neutroni particolarmente potente potrebbe essere responsabile di un lampo radio veloce.

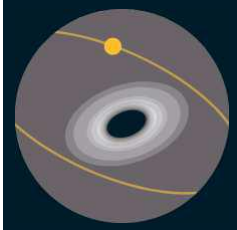
Collisione di stelle di neutroni

Se due stelle di neutroni collidono, l'impatto potrebbe liberare un lampo intenso e produrre un buco nero o forse una stella di neutroni gigantesca.



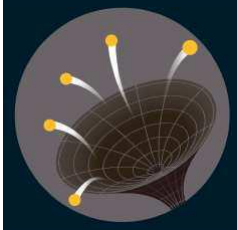
Supernova energetica

Quando le stelle con massa elevata muoiono, collassano in un'esplosione chiamata supernova. Forse gli FRB sono supernove particolarmente ricche di energia.



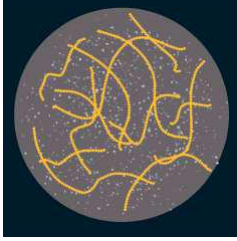
Interazione con una magnetar

Le stelle di neutroni altamente magnetizzate, le magnetar, emettono luce alimentata dalla loro energia magnetica anziché dalla rotazione. Se una orbitasse a spirale attorno a un buco nero che inghiotte materia (chiamato nucleo galattico attivo), l'interazione potrebbe avere come risultato un FRB.



Evaporazione di un buco nero primordiale

Alcuni teorici ipotizzano che il big bang abbia potuto creare buchi neri primordiali sparsi per tutto lo spazio. Se uno evaporasse spontaneamente, si potrebbe verificare un lampo di luce radio.



Stringhe cosmiche

Questi difetti nello spazio-tempo sono un altro possibile risultato esotico del big bang. Se esistessero, allora potrebbero aver provocato i lampi radio veloci mentre interagivano con il plasma che riempiva l'universo primordiale.

121102, Spitler e colleghi avevano invece osservato dieci lampi aggiuntivi. I tempi di arrivo non sembrano periodici, e la durata precisa e altre caratteristiche degli impulsi radio variano.

Questa scoperta ha incoraggiato campagne di osservazione con radiotelescopi in tutto il mondo, una delle quali ha usato il Very Large Array (VLA) in New Mexico, un insieme di 27 radioantenne che osservano congiuntamente, per cercare eventi sulla scala dei millisecondi nella stessa regione del cielo di FRB 121102. Questa ricognizione era unica, per la sua capacità di localizzare le posizioni dei lampi radio con una precisione migliore di diversi ordini di grandezza rispetto a una singola antenna radio. Dopo circa sei mesi di osservazioni, il gruppo di ricerca diretto da Shami Chatterjee, della Cornell University, ha scoperto e localizzato un lampo. Presto è arrivata una posizione ancora più precisa per questo FRB, grazie alla tecnica dell'interferometria a base molto lunga, in cui i segnali provenienti da più telescopi di tutto il mondo sono combinati in modo da sintetizzare un telescopio virtuale molto più grande con un'ottima risoluzione. Il rilevamento – guidato da Benito Marcote, del Joint Institute for VLBI ERIC (JIVE), nei Paesi Bassi, e colleghi – ha localizzato i lampi ripetuti da FRB 121102 con un'incertezza di meno di un secondo d'arco (1/3600 di grado).

È stata la prima volta in cui gli astronomi hanno fissato una posizione così precisa per un FRB, il che ha permesso di identificare la galassia da cui ha avuto origine il lampo. Un gruppo guidato da Shriharsh Tendulkar, della McGill University di Montréal, in Canada, ha rintracciato l'origine di FRB 121102 in una galassia nana con una massa circa 20.000 volte più piccola della Via Lattea e che si trova a una distanza circa 20.000 volte più grande della pulsar più lontana conosciuta. Queste scoperte hanno confermato meglio che mai che gli FRB sono fenomeni potenti ed estremamente distanti.

Alla ricerca delle sorgenti

Ormai abbiamo accertato che gli FRB sono autentici fenomeni cosmici, ma abbiamo ancora molta strada da fare per capire che cosa li provochi.

Un problema importante è se queste esplosioni provengano da eventi occasionali come le supernove o da oggetti duraturi, come le pulsar che emettono periodicamente lampi brillanti. Il caso del lampo ripetuto, FRB 121102, suggerisce quest'ultima ipotesi. Sebbene sia finora l'unico FRB per cui sono stati rilevati più lampi, è possibile che tutti gli FRB si ripetano e che i lampi isolati osservati da altre direzioni rappresentino solo i più luminosi in una distribuzione di energie. In questo caso escluderemmo gli eventi singoli e terremmo d'occhio le fonti cosmiche durature.

In questa categoria molti scienziati preferiscono spiegazioni che prevedono stelle compatte come le pulsar. Questi oggetti si formano quando una stella grande muore generando una supernova e gran parte della sua massa collassa su se stessa. La densità di questo oggetto bizzarro diventa così grande che addirittura gli atomi non riescono a sopportare la pressione, e i loro protoni ed elettroni si spiaccicano l'uno con l'altro e diventano neutroni. Il prodotto finale è una stella larga quanto Manhattan fatta quasi interamente di neutroni, chiamata appunto stella di neutroni. Queste stelle ruotano molto rapidamente ed emettono luce da due poli. Le pulsar di cui abbiamo parlato sono quelle in cui questi fasci sono puntati verso la Terra e di cui vediamo la luce lampeggiare. I lampi ripetuti provenienti da FRB 121102 hanno proprietà che sono coerenti con impulsi estremamente energetici emessi da una giovane stella di neutroni. Quindi gli FRB potrebbero in definiti-

Infografica di Nigel Hawtin

va essere davvero pulsar, anche se in una forma rara e particolarmente potente.

Un'idea correlata è la possibilità che gli FRB provengano dalle cosiddette magnetar: stelle di neutroni con un campo magnetico intenso, a rotazione lenta, le cui emissioni sono alimentate dalla loro energia magnetica piuttosto che dalla loro rotazione. Un aspetto curioso delle osservazioni VLA di FRB 121102 è la presenza di una luce radio intensa e duratura, distinta dalle esplosioni FRB, nella galassia ospite. Gli astronomi hanno ipotizzato che questa luce radio sia un nucleo galattico attivo – un buco nero supermassiccio che inghiotte stelle e gas – e che l'FRB sia prodotto dall'interazione tra una magnetar e questo nucleo.

Una variante di questa idea è che i lampi ripetuti provengano sì da una magnetar ma sepolta nel denso residuo dell'esplosione di una supernova superluminosa (circa dieci volte più energica di una tipica supernova) avvenuta qualche decennio fa. Un gruppo di ricercatori ha notato che la galassia ospite di FRB 121102 è simile a quelle che ospitano un fenomeno noto come lampi di raggi gamma, che si pensa siano collegati a magnetar estremamente giovani che si sono formate durante supernove superluminose. Di recente questa squadra ha misurato il campo magnetico lungo la visuale da noi a FRB 121102. Queste osservazioni mostrano che, indipendentemente dalla sua fonte, FRB 121102 deve trovarsi in una regione con una magnetizzazione relativamente elevata, come un denso residuo di supernova o nei pressi di un buco nero supermassiccio nel nucleo di una galassia.

Non possiamo però ancora escludere eventi una tantum. Forse alcuni lampi si ripetono e altri no, a indicare che FRB diversi abbiano varie origini diverse. Un nuovo studio diretto da Divya Palaniswamy, all'epoca all'Università del Nevada a Las Vegas, ha dimostrato che se tutti gli FRB si ripetessero alla frequenza osservata in FRB 121102, dovremmo aver osservato eventi multipli in diversi altri casi. È quindi forse più plausibile considerare che alcuni FRB hanno origine in cataclismi occasionali. Rimaniamo così con un certo numero di fonti candidate.

In cima all'elenco c'è la collisione di due stelle di neutroni. Un impatto del genere scatenerebbe probabilmente una forte esplosione al contatto mentre le due stelle compatte si fondono e formano un unico buco nero gigantesco. Una seconda possibilità per un evento una tantum è l'esplosione di una supernova particolarmente energica.

I teorici hanno anche avanzato ipotesi più esotiche. Una è l'idea delle stringhe cosmiche: difetti topologici nello spazio e nel tempo che secondo la teoria si sarebbero formati nell'universo delle origini. Questi deformazioni si sarebbero mosse per il cosmo alla velocità della luce, che poi si è riempito di plasma caldo, e si sarebbero così prodotte scintille dalla loro interazione con il plasma. Sebbene la teoria che quelle scintille siano FRB non sia esclusa dalle osservazioni attuali, è puramente ipotetica. Sono stati considerati anche i cosiddetti buchi neri primordiali: piccoli buchi neri generati alla nascita dell'universo, che però finora non sono stati rilevati. Se uno di questi buchi neri primordiali evapora spontaneamente è possibile che rilasci radiazioni che potrebbero corrispondere a un segnale FRB. Se una di queste idee si rivelasse vera, il lampo di Lorimer sarebbe la prima prova osservativa di questi fenomeni esotici.

Cartografia celeste

Dopo un decennio di lavoro, la scienza degli FRB è ora pronta per entrare in una fase di trasformazione grazie a nuovi telescopi. L'Australian Square Kilometer Array Pathfinder, con il suo ampio campo visivo, è stato inaugurato nel 2012 e ha subito cominciato a scoprire FRB. Al momento della scrittura di questo articolo, sono noti 50 lampi. Strutture esistenti, come il VLA e il radiotelescopio Molonglo, dell'Università di Sydney, sono state rinnovate per aumentarne notevolmente sensibilità e copertura del cielo. I nuovi radiotelescopi più avanzati ora in arrivo – il Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment e il Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) cinese, fra gli altri – dovrebbero aumentare in modo significativo il campione di FRB e permetterci di capire molto meglio le popolazioni da cui provengono.

Alcuni dei nuovi telescopi possono localizzare gli FRB in tempo reale con una precisione di un secondo d'arco, migliorando notevolmente la nostra capacità di localizzarli. Queste informazioni sulla posizione ci permettono di far seguire rapidamente osservazioni su altre lunghezze d'onda per cercare le galassie ospiti del lampo. Ancora più entusiasmante è che alcuni modelli degli FRB, come le fusioni di stelle di neutroni, prevedono anche l'emissione di onde gravitazionali.

Una volta chiarite identità e origine degli FRB, questi segnali potranno essere usati per mappare l'universo

Adesso gli astronomi possono rilevare queste increspature nello spazio-tempo grazie al Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO), che nel 2015 ha rilevato per la prima volta onde gravitazionali, un risultato premiato con il Nobel, e a Virgo, un osservatorio analogo costruito vicino a Pisa. Con questa nuova tecnologia c'è una reale possibilità di rilevare congiuntamente luce e onde gravitazionali da queste fonti. Un rilevamento simile consentirebbe di misurare le proprietà degli FRB – come la massa della sorgente – che è impossibile ottenere con altri mezzi. Prevediamo che presto faremo progressi nella scoperta e nella comprensione di questi messaggeri cosmici.

Se risolveremo il mistero dell'identità e dell'origine degli FRB, potremmo usare questi nuovi segnali per un progetto ambizioso: mappare l'universo. Gli astronomi sono ancora all'inizio nel tracciare la distribuzione di materia nello spazio e nel visualizzare le strutture su larga scala che essa forma. Gli FRB potrebbero darci un grande aiuto per la cartografia cosmica. Sono le uniche fonti extragalattiche note con una scala temporale sufficientemente breve per misurare la dispersione intergalattica e quindi determinare quanto sia densa la materia lungo la nostra visuale. La densità nel mezzo intergalattico è una previsione critica di vari modelli per la struttura su larga scala dell'universo, e le informazioni dagli FRB potrebbero permetterci di verificare quali siano corretti.

Ora che abbiamo una serie globale di rilevamenti FRB su tutto il cielo, con misurazioni di distanza indipendenti tra loro, otterremo nuove verifiche di ciò che sappiamo a livello fondamentale su come si è formato ed evoluto il cosmo. In effetti la scoperta iniziale di Narkevic si è rivelata «abbastanza interessante». ■

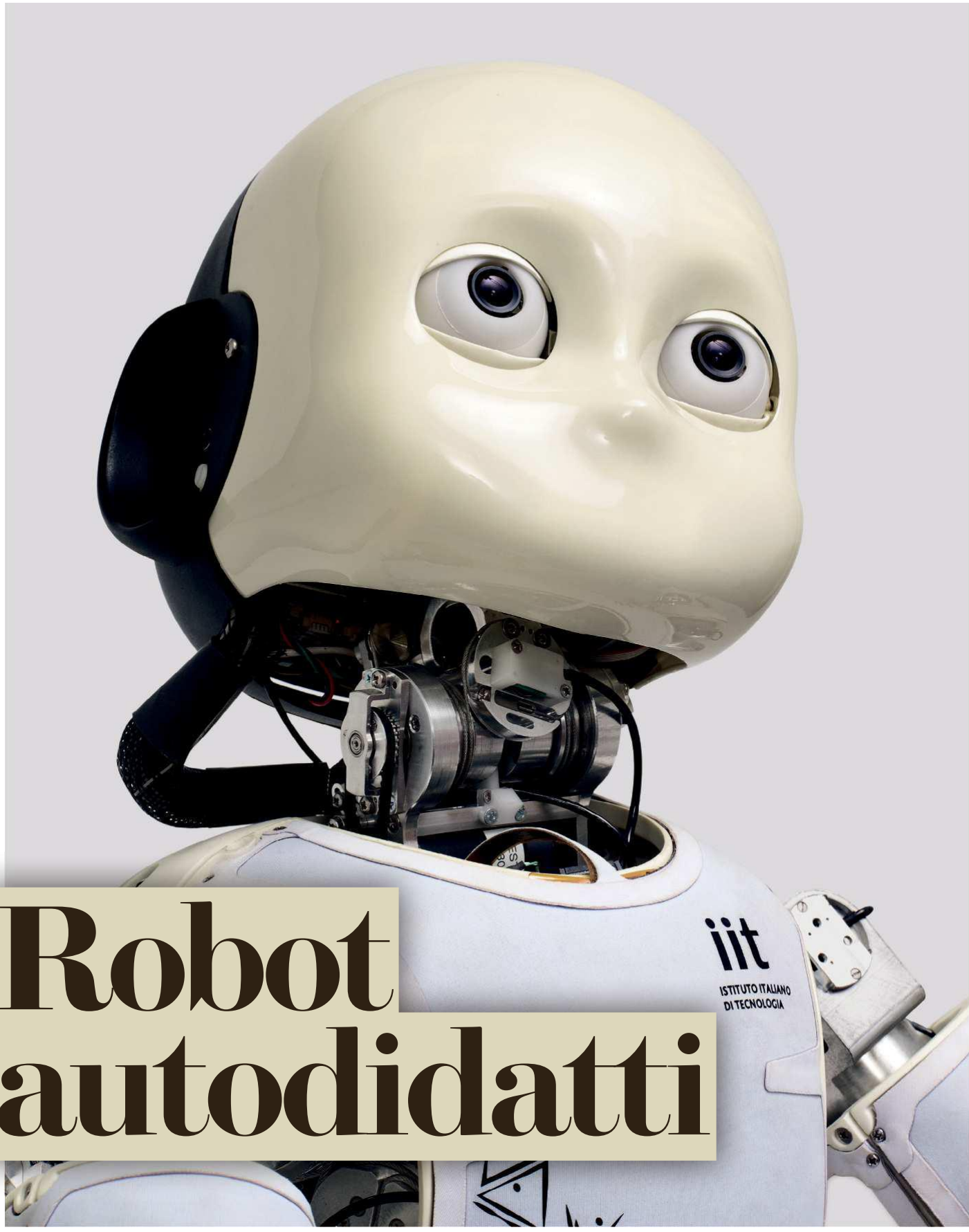
PER APPROFONDIRE

A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin. Lorimer D.R. e altri, in «Science», Vol. 318, pp. 777-780, 2 novembre 2007.

A Direct Localization of a Fast Radio Burst and its Host. Chatterjee S. e altri, in «Nature», Vol. 541, pp. 58-61, 5 gennaio 2017.

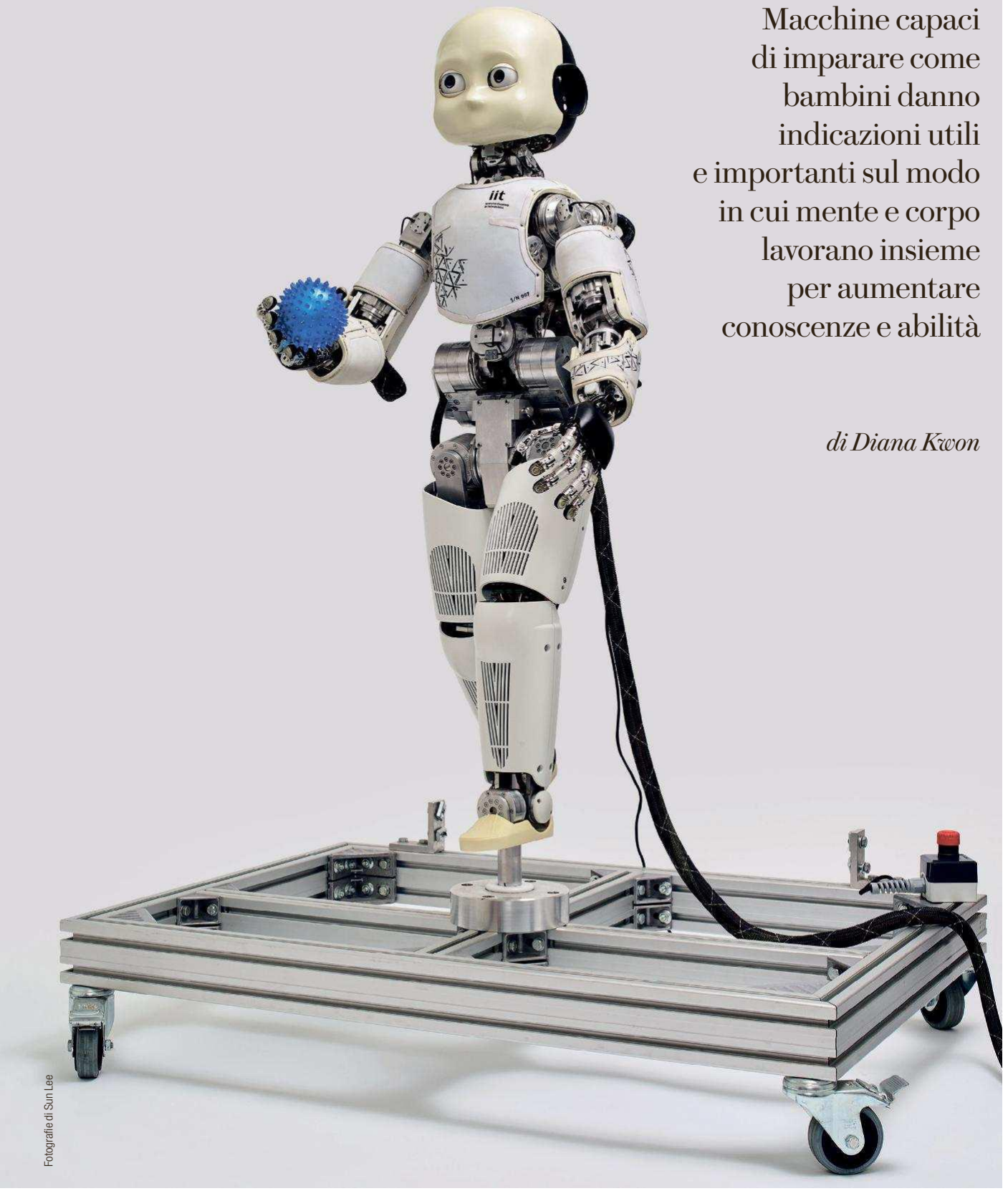
Fuochi d'artificio stellari. Kasen D., in «Le Scienze» n. 576, agosto 2016.

Robot autodidatti



Macchine capaci di imparare come bambini danno indicazioni utili e importanti sul modo in cui mente e corpo lavorano insieme per aumentare conoscenze e abilità

di Diana Kwon



Fotografie di Sun Lee

Diana Kwon è una giornalista laureata in neuroscienze alla McGill University. Vive a Berlino e scrive articoli su salute e scienze biologiche.

Nel film di fantascienza del 2015 *Humandroid*, il personaggio di Deon è un ingegnere che vuole creare una macchina capace di pensare e di provare emozioni, e per raggiungere questo scopo scrive un programma di intelligenza artificiale (IA) in grado di apprendere come un bambino.

Il soggetto dei test, Chappie, ha una mente che all'inizio è quasi una *tabula rasa* ma poi, solo osservando e facendo esperienza di ciò che lo circonda, acquisisce una cultura generale, il linguaggio e varie capacità complesse, una cosa che al giorno d'oggi non sono in grado di fare neanche i sistemi di IA più avanzati.

È vero, ci sono già macchine che superano le capacità umane in compiti specifici, come giocare al quiz *Jeopardy*, a scacchi o al gioco da tavolo cinese *Go*. A ottobre 2017 la società britannica DeepMind ha presentato AlphaGo Zero, l'ultima versione del suo sistema di IA per *Go*. A differenza del predecessore, AlphaGo, che aveva imparato a giocare analizzando un gran numero di partite giocate dagli esseri umani, in questa versione il sistema ha accumulato esperienza in modo autonomo, giocando contro se stesso. Nonostante il risultato notevole, AlphaGo Zero è limitato all'apprendimento di un gioco con chiare regole e ha avuto bisogno di giocare milioni di partite per ottenere la sua capacità sovrumana.

Gli esseri umani, al contrario, si sviluppano fin dalla più tenera infanzia esplorando l'ambiente che li circonda e sperimentando movimenti e parole. Raccolgono dati su se stessi, si adattano alle situazioni nuove e trasferiscono le conoscenze ad altri settori.

Dall'inizio del XXI secolo, esperti di robotica, neuroscienze e psicologia studiano come costruire macchine che imitino questo sviluppo spontaneo. Dalla collaborazione tra le diverse discipline sono nati androidi in grado di muovere oggetti, di acquisire un vocabolario e alcune abilità numeriche di base e addirittura di mostrare segnali di comportamento sociale. Allo stesso tempo, questi sistemi di IA aiutano gli psicologi a capire i meccanismi dell'apprendimento nei neonati.

Macchina di previsione

Il nostro cervello cerca continuamente di prevedere il futuro e aggiorna le proprie aspettative in modo che corrispondano alla realtà. Facciamo un esempio: se abbiamo un cucciolo socievole, quando incontriamo il gatto del vicino per la prima volta ci aspetteremmo che anche a lui piaccia essere accarezzato. Quando proviamo a fargli una carezza, però, il gatto ci graffia. Allora modifichiamo la nostra teoria sugli animali che sembrano teneri, ipotizzando magari che il gatto sarà più amichevole se arriviamo con qualcosa di buono da mangiare. Quando ci avviciniamo con un bocconcino, il gatto si lascia accarezzare senza infliggerci altre ferite. Così la prossima volta che incontriamo un gattino gli offriamo un pezzetto di tonno prima di provare a toccarlo.

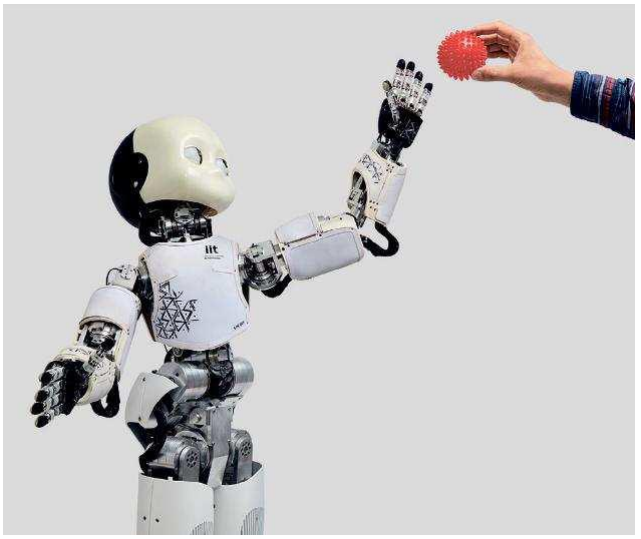
In questo modo i centri di elaborazione di livello superiore nel cervello raffinano i propri modelli interni in base ai segnali che ricevono dagli organi sensoriali. Prendete i nostri sistemi visivi, che sono estremamente complessi. Le cellule nervose nell'occhio elaborano gli elementi di base di un'immagine prima di trasferire queste informazioni alle regioni di livello superiore che interpretano il significato d'insieme di una scena. È interessante notare che le connessioni neurali vanno anche nel senso opposto: dai centri di elaborazione di alto livello, come le aree della corteccia parietale o temporale, a quelli di basso livello, come la corteccia visiva primaria e il nucleo genicolato laterale (*si veda il box a p. 40*). Alcuni neuroscienziati ritengono che queste connessioni «verso il basso» portino le previsioni del cervello verso i livelli inferiori, influendo su ciò che vediamo.

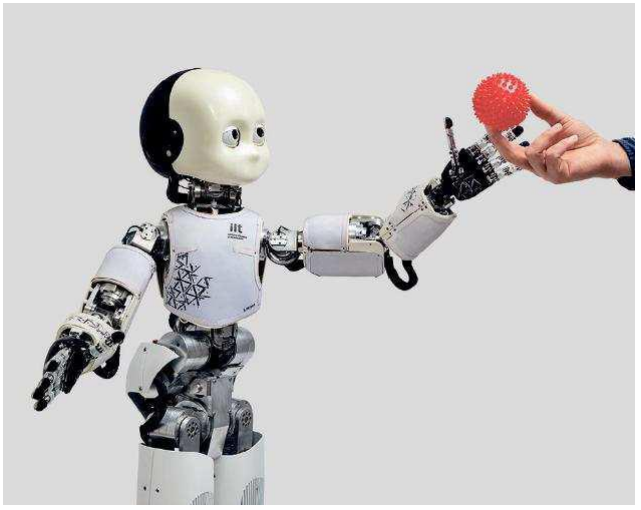
Una cosa cruciale in questo contesto è che i segnali che si muovono verso il basso dai livelli alti del cervello interagiscono continuamente con quelli che dai sensi vanno verso l'alto, generando così l'errore di previsione, che è la differenza tra quello che ci aspettiamo e quello che sperimentiamo. Un segnale ritorna ai livelli alti per comunicare questa differenza e aiuta così a raffinare i modelli interni e a generare nuove previsioni, in un circolo continuo. «Il segnale dell'errore di previsione guida il sistema nello stimare ciò che c'è davvero là fuori», afferma Rajesh P. N. Rao, neuroscienziato computazionale all'Università di Washington.

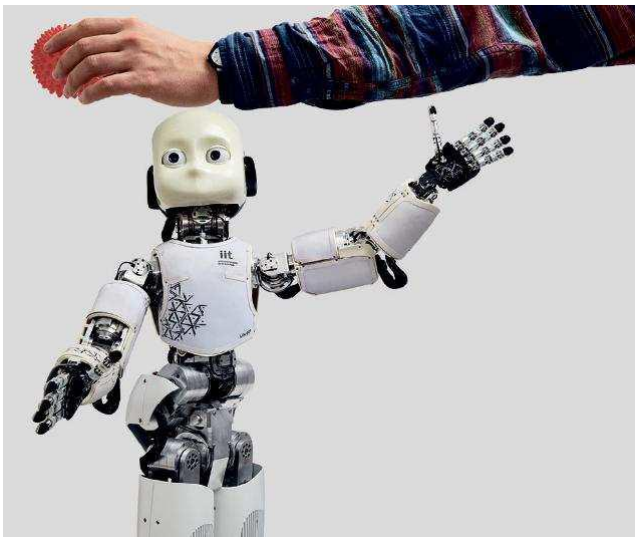
Quando era studente di dottorato all'Università di Rochester, Rao e il suo relatore, il neuroscienziato computazionale Dana H. Ballard, che oggi è all'Università del Texas ad Austin, sono stati i primi a testare questo genere di codice predittivo in una rete neura-

IN BREVE

I bambini molto piccoli apprendono in modo autonomo, facendo esperienze con il proprio corpo e giocando con gli oggetti. **Alcuni esperti di robotica** stanno creando androidi con algoritmi che permettano loro di imparare come i bambini. **Gli studi su queste macchine** rappresentano una rivoluzione per la robotica e offrono indicazioni utili sullo sviluppo dei bambini.







Un androide iCub studiato all'Università di Plymouth, nel Regno Unito, impara più facilmente parole nuove come «palla» se il ricercatore colloca l'oggetto corrispondente sempre nello stesso posto quando lo nomina.

le artificiale. (Le reti neurali sono una famiglia di algoritmi computerizzati modellati sul cervello umano, che adattano i propri parametri interni in modo incrementale per generare l'output richiesto a partire dall'input ricevuto.) In quell'esperimento computazionale, pubblicato nel 1999 su «Nature Neuroscience», i ricercatori simulavano le connessioni neurali della corteccia visiva, incluse sia quelle che portavano verso il basso le previsioni sia quelle che portavano verso l'alto i segnali sensoriali provenienti dal mondo esterno. Dopo averla addestrata con immagini della natura, hanno scoperto che la rete era in grado di riconoscere gli elementi chiave di un'immagine, per esempio le strisce di una zebra.

Contare sulle dita

Una differenza fondamentale tra noi e molti sistemi di IA attuali è che noi abbiamo un corpo che possiamo usare per muoverci e per agire nel mondo. Neonati e bambini si sviluppano testando i movimenti delle proprie braccia, gambe e dita delle mani e dei piedi ed esaminando tutto ciò che capita loro a tiro. In modo autonomo imparano a parlare, camminare e riconoscere oggetti e persone. Come sia possibile che facciano tutto questo senza grandi aiuti è una domanda chiave negli studi di psicologia dello sviluppo e di robotica. La collaborazione tra i ricercatori delle due discipline sta portando risultati sorprendenti in entrambi i campi.

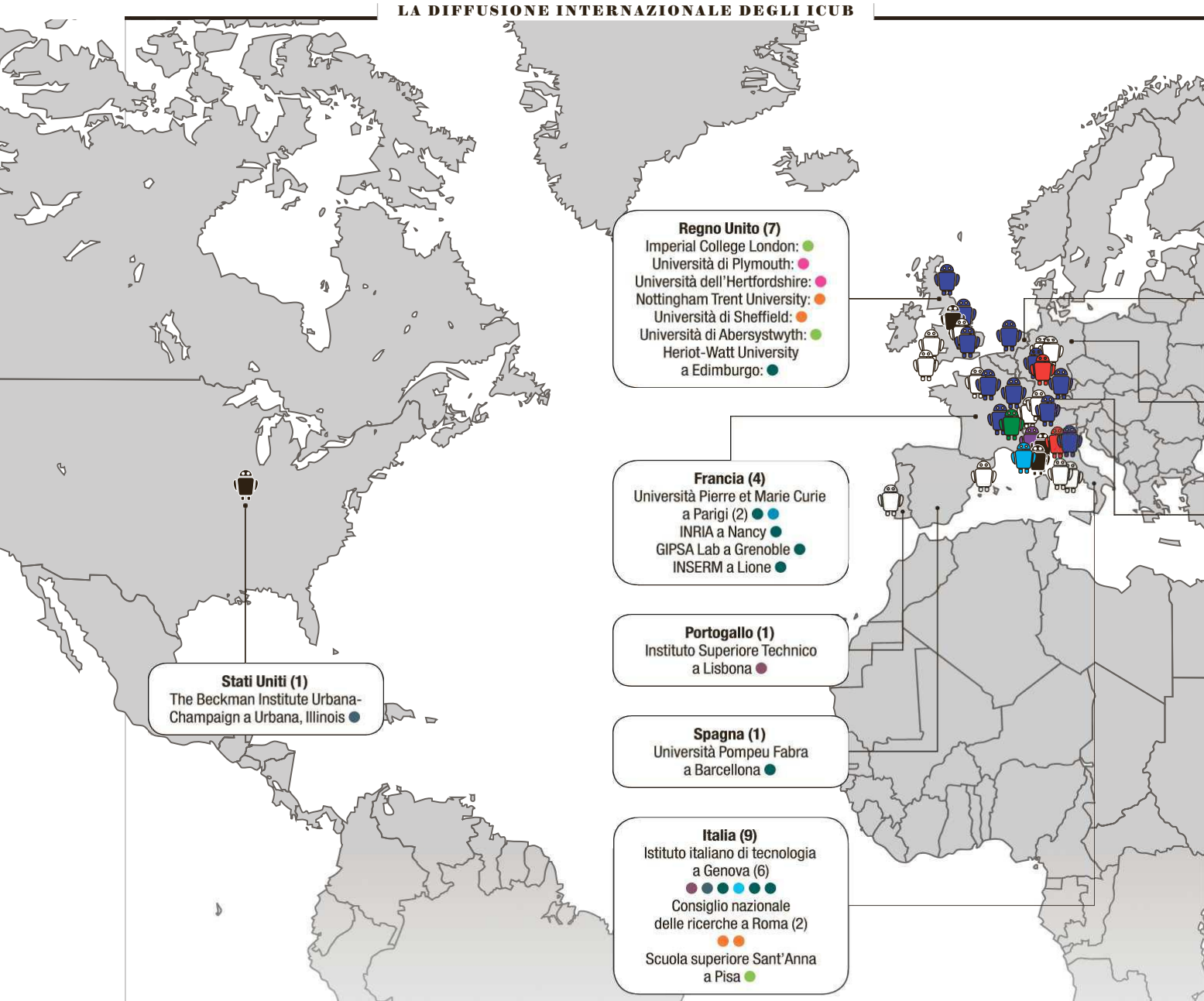
In esperimenti pionieristici iniziati alla fine degli anni novanta, l'esperto di robotica Jun Tani, che ai tempi lavorava ai Sony Computer Science Laboratories, sviluppò con l'aiuto di altri colleghi una rete neurale a base predittiva per l'apprendimento dei movimenti di base e testò la funzionalità di quegli algoritmi nei robot. Si scoprì così che le macchine potevano sviluppare capacità elementari come muoversi in ambienti semplici, imitare gesti delle mani e seguire ordini verbali basilari come «mira» e «colpisci».

Più di recente Angelo Cangelosi, esperto di robotica dell'Università di Plymouth, e Linda B. Smith, psicologa dello sviluppo all'Università dell'Indiana a Bloomington, hanno dimostrato quanto sia importante il corpo nell'acquisire conoscenza. «La forma del corpo di un robot e il genere di cose che può fare influenzano le esperienze che ha e le cose che può apprendere», afferma Smith. Uno dei soggetti principali dei test di questi due ricercatori è iCub, un robot umanoide alto 104 centimetri costruito dall'Istituto italiano di tecnologia di Genova a scopo di ricerca. iCub non ha funzioni preprogrammate, il che permette ai ricercatori di metterea punto algoritmi specifici per i loro esperimenti.

In uno studio del 2015, Cangelosi, Smith e colleghi hanno dotato un iCub di una rete neurale che dava al robot la capacità di imparare semplici associazioni e hanno scoperto che apprendeva parole nuove molto più facilmente quando i nomi degli oggetti erano collegati a specifiche posizioni del corpo. I ricercatori mettevano ripetutamente una palla o una tazza a sinistra o a destra dell'androide, in modo che associasse l'oggetto ai movimenti che doveva fare per guardarlo, per esempio girare la testa. Poi abbinavano questa azione al nome dell'oggetto. Il robot imparava queste parole semplici più facilmente quando l'oggetto corrispondente appariva in un posto specifico piuttosto che in vari posti diversi.

È interessante notare che quando i ricercatori hanno ripetuto l'esperimento con bambini di 16 mesi hanno ottenuto risultati simili: collegare gli oggetti a particolari posizioni del corpo aiutava i bambini a imparare l'associazione delle parole. Il laboratorio di Cangelosi sta sviluppando la tecnica per insegnare ai robot parole più astratte come «questo» o «quello», parole che non sono collegate a oggetti specifici.

LA DIFFUSIONE INTERNAZIONALE DEGLI ICUB



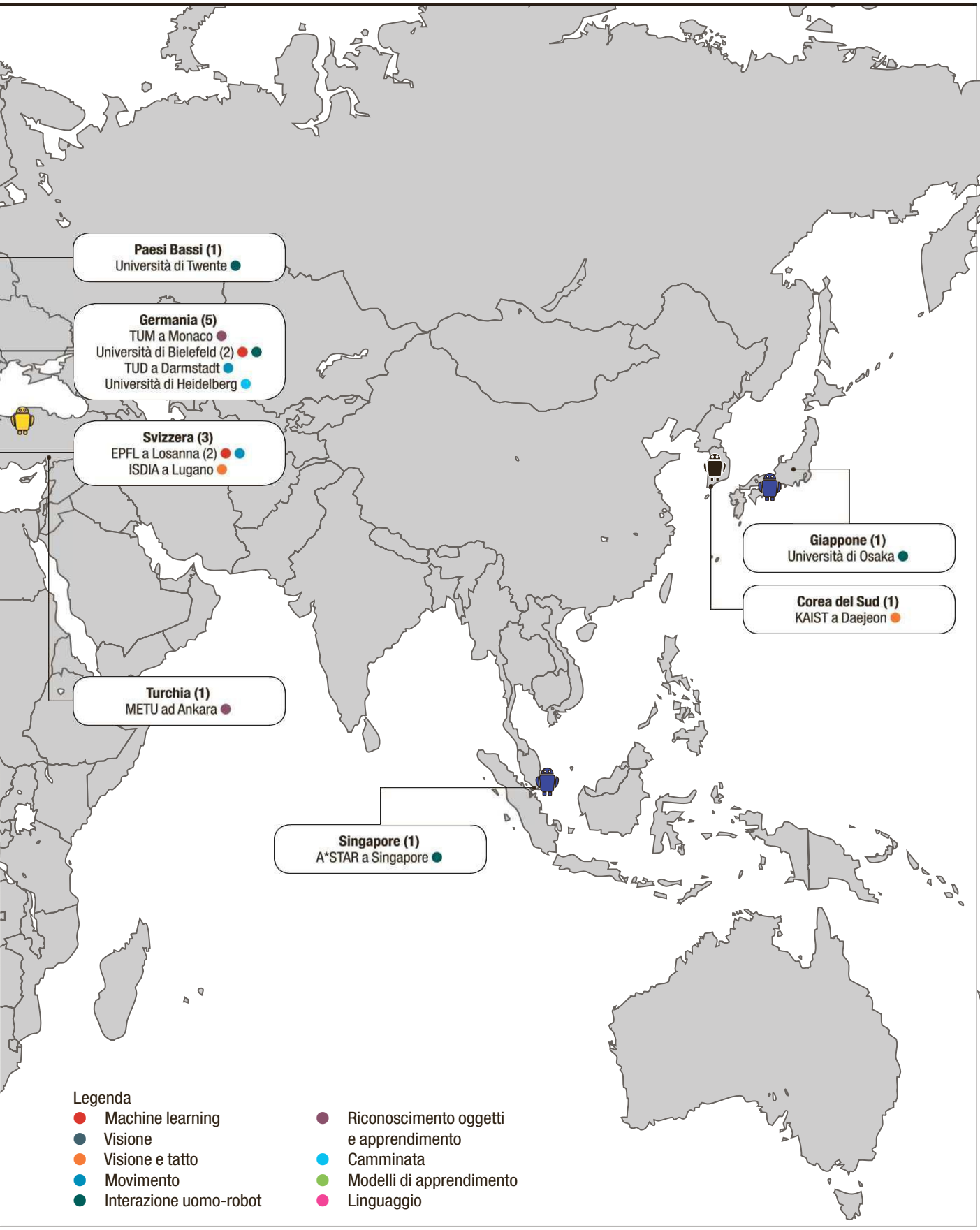
Un robot in giro per il mondo

Da più di dieci anni le ricerche di robotica hanno beneficiato della presenza di una piattaforma comune, standardizzata e *open source* per lo studio sull'intelligenza artificiale *embodied*: il robot umanoide iCub.

«Nato» a Genova nel 2004 all'Istituto italiano di tecnologia (IIT) come parte di un progetto europeo, e giunto ora alla sua terza versione, oggi iCub è forse il robot umanoide più usato del mondo a scopo di ricerca; la comunità dei suoi utilizzatori conta oltre 160 studiosi, che contribuiscono allo sviluppo continuo delle sue abilità coordinati dai ricercatori dell'IIT diretti da Giorgio Metta. Grande più o meno come un bambino di cinque anni, iCub sa camminare, interagire con l'ambiente e riconoscere oggetti, ed è uno dei pochi robot al mondo dotati di una «pelle» elettronica che gli fornisce un senso del «tatto». Le attività di ricerca per cui è impiegato spaziano dall'apprendimento automatico alle interazioni uomo-macchina, fino all'acquisizione del linguaggio e al controllo della visione e del movimento.

La mappa mostra la diffusione attuale degli iCub nel mondo: si tratta di 38 esemplari, che diventeranno 40 entro la fine di quest'anno. (I pallini colorati accanto al nome dell'istituzione che ne ha uno o più esemplari indicano l'area di ricerca in cui sono impegnati).

Fonte IIT; elaborazione grafica Le Scienze


Paesi Bassi (1)
Università di Twente
Germania (5)
TUM a Monaco
Università di Bielefeld (2)
TUD a Darmstadt
Università di Heidelberg
Svizzera (3)
EPFL a Losanna (2)
ISDIA a Lugano
Turchia (1)
METU ad Ankara
Singapore (1)
A*STAR a Singapore
Giappone (1)
Università di Osaka
Corea del Sud (1)
KAIST a Daejeon
Legenda
Machine learning
Visione
Visione e tatto
Movimento
Interazione uomo-robot
Riconoscimento oggetti e apprendimento
Camminata
Modelli di apprendimento
Linguaggio

Usare il corpo può aiutare bambini e robot anche a imparare le abilità numeriche di base. Per esempio, alcuni studi dimostrano che i bambini che hanno difficoltà a rappresentare mentalmente le proprie dita tendono anche a essere più deboli in matematica. In uno studio del 2014 Cangelosi e il suo gruppo hanno scoperto che, se insegnavano ai robot a contare sulle dita, le reti neurali rappresentavano i numeri in modo più accurato rispetto a quando insegnavano ai robot a contare usando i nomi dei numeri.

Il motore della curiosità

Anche le novità aiutano i bambini a imparare. In un articolo su «Science» del 2015, ricercatori della Johns Hopkins University hanno mostrato che quando i neonati incontrano l'ignoto, per esempio un oggetto solido che sembra attraversare un muro, analizzano le loro aspettative precedenti che sono state violate. In termini prosaici, la loro tendenza innata a ridurre gli errori di previsione favorisce il loro sviluppo.

Pierre-Yves Oudeyer, esperto di robotica del francese Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, è convinto che il processo di apprendimento sia più complesso. Sostiene che i bambini cerchino attivamente, e con una raffinatezza sorprendente, gli oggetti dell'ambiente circostante che offrono le migliori opportunità di apprendimento. Per esempio, un bambino piccolo sceglierà più probabilmente di giocare con una macchinina che con un puzzle da 100 pezzi, presumibilmente perché il suo livello di conoscenze gli permette di generare ipotesi testabili sulla macchinina più facilmente che sul puzzle.

Per mettere alla prova questa teoria, Oudeyer e colleghi hanno creato sistemi robotici dotati di una caratteristica che chiamano motivazione intrinseca, in cui una diminuzione dell'errore di previsione determina un premio. Per una macchina intelligente, il premio può corrispondere a una grandezza numerica che il robot è stato programmato a massimizzare con le proprie azioni. Questo meccanismo ha permesso a un robot Sony AIBO, una piccola macchina a forma di cane con capacità sensoriali e motorie di base, di cercare autonomamente i compiti da svolgere scegliendo quelli con il maggior potenziale di apprendimento. I cani robot erano in grado di acquisire capacità semplici, come afferrare un oggetto e interagire vocalmente con un altro robot, senza essere stati programmati a questo scopo. Il risultato, spiega Oudeyer, è «un effetto collaterale del fatto che il robot esplora il mondo, spinto dalla motivazione a migliorare le proprie previsioni».

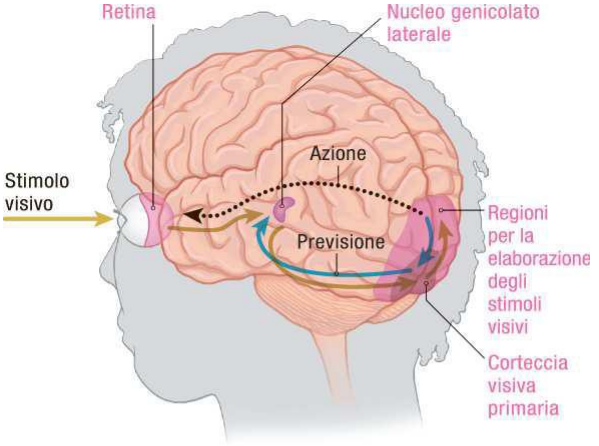
È notevole il fatto che, sebbene i robot fossero stati sottoposti a fasi di addestramento simili, il caso aveva un'influenza su ciò che apprendevano. Alcuni esploravano un po' di meno, altri un po' di più, e alla fine sapevano cose diverse. Per Oudeyer, i risultati variegati indicano che anche con la stessa programmazione e un ambiente formativo simile i robot possono raggiungere livelli di competenza diversi, proprio come avviene in una classe scolastica normale.

Più di recente, Oudeyer ha usato simulazioni computazionali per dimostrare che un tratto vocale robotico equipaggiato con questi algoritmi predittivi (e l'hardware necessario) può apprendere anche gli elementi di base del linguaggio. Oggi Oudeyer collabora con Jacqueline Gottlieb, neuroscienziata cognitiva della Columbia University, per capire se questa motivazione intrinseca a base predittiva sia alla base anche della neurobiologia della curiosità umana e sostiene che studiare più a fondo questi modelli può aiutare gli psicologi a capire quello che succede nel cervello dei bambini con disabilità e disturbi dello sviluppo.

IPOTESI

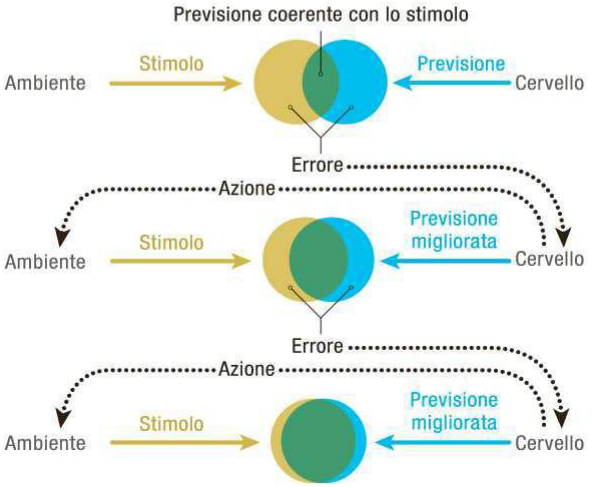
Un cervello che prevede

La nostra mente è una macchina predittiva, che usa esperienze e conoscenze già acquisite per dare un senso al diluvio di informazioni che arrivano dall'ambiente. Molti neuroscienziati e psicologi ritengono che quasi tutto ciò che facciamo (percezione, azione e apprendimento) si basi sulla capacità di creare e aggiornare le proprie aspettative.



Elaborazione degli stimoli visivi

L'anatomia sostiene l'idea dell'elaborazione predittiva. Per esempio, la corteccia visiva riceve stimoli dall'occhio, ma ci sono connessioni che operano in senso opposto. Gli scienziati ritengono che queste connessioni «verso il basso», dai livelli più alti del cervello a quelli più bassi (come la corteccia visiva primaria e il nucleo genicolato laterale), trasportino le previsioni. Queste si incrociano con lo stimolo sensoriale per generare l'errore di previsione: la differenza tra ciò che ci aspettiamo e ciò che vediamo. Un segnale che codifica questa differenza ritorna ai livelli più alti del cervello. Altri segnali verso il basso trasportano i comandi per i movimenti dei muscoli dell'occhio, che permettono di regolare ciò che vediamo.



Previsioni a cascata

Quando il cervello genera un errore di previsione, usa questa informazione per aggiornare le proprie aspettative e scegliere azioni che aiutino a risolvere la differenza tra quello che crede e la realtà. Per esempio, se una persona guarda un oggetto e non riesce a capire che cosa sia, il cervello può inviare l'ordine di prendere l'oggetto in mano e di esaminarlo alla ricerca di ulteriori informazioni.

Illustrazione di Mesa Schumacher (*cervello*) e Amanda Montañez (*illustrazione a cascata*)

Androidi altruistici

Il nostro cervello cerca di prevedere il futuro anche quando interagiamo con altre persone: cerchiamo continuamente di dedurre le intenzioni degli altri e di anticipare quello che potrebbero dire. È interessante notare che la tendenza a ridurre l'errore di previsione può di per sé indurre un comportamento sociale di base, come hanno dimostrato l'esperta di robotica Yukie Nagai e colleghi all'Università di Osaka, in Giappone, nel 2016.

Il gruppo ha scoperto che anche quando iCub non era programmato con una capacità di socializzazione intrinseca, bastava la motivazione a ridurre l'errore di previsione per spingerlo a comportarsi in modo collaborativo. Per esempio, dopo che gli era stato insegnato a spingere un camion giocattolo, osservava un ricercatore che non riusciva a compiere la stessa azione e spesso prendeva l'iniziativa di mettere il giocattolo al posto giusto, solo per aumentare la probabilità che il camion si trovasse in un dato posto. Secondo Nagai, oggi al National Institute of Information and Communications Technology in Giappone, i bambini potrebbero svilupparsi nello stesso modo. «Un piccolo non ha bisogno di intenzione per aiutare gli altri», dice Nagai: la sola spinta a ridurre al minimo l'errore di previsione può dare inizio alle prime abilità sociali.

Forse l'elaborazione predittiva potrebbe aiutare a capire alcuni disturbi dello sviluppo, come l'autismo. Per Nagai, alcune persone autistiche possono avere una sensibilità elevata agli errori di previsione, il che fa sì che le informazioni sensoriali in entrata siano per loro eccessive. Ciò potrebbe spiegare perché sono attratti dai comportamenti ripetitivi, che hanno risultati altamente prevedibili.

Harold Bekkering, psicologo cognitivo alla Radboud Universiteit, nei Paesi Bassi, ritiene che l'elaborazione predittiva potrebbe spiegare anche il comportamento delle persone affette da disturbo da deficit di attenzione e iperattività. Secondo questa teoria, gli autistici preferiscono proteggersi da ciò che non conoscono, mentre coloro che hanno difficoltà a concentrarsi sono continuamente attratti dagli stimoli imprevedibili dell'ambiente, spiega Bekkering. «Ci sono persone che sono sensibili al mondo e lo esplorano, mentre altre che sono troppo sensibili per il mondo e se ne proteggono. Nel quadro del codice predittivo si possono simulare molto bene entrambe le situazioni». Oggi Bekkering lavora per testare questa ipotesi usando immagini diagnostiche del cervello umano.

Nagai spera di valutare la teoria con studi di «rispecchiamento cognitivo» in cui robot con algoritmi per l'apprendimento predittivo dovranno interagire con le persone. Dato che il robot e la persona comunicano anche con il linguaggio del corpo e le espressioni del volto, la macchina dovrà adattare il proprio comportamento rispecchiando quello del partner umano, così rifletterà la preferenza umana per la prevedibilità. In questo modo i ricercatori possono usare i robot per costruire modelli della cognizione umana e poi esaminarne l'architettura neurale per decifrare ciò che avviene nella mente dell'uomo. «Possiamo esternalizzare le nostre caratteristiche nei robot per capire meglio noi stessi», spiega Nagai.

Robot del futuro

Così gli studi sui bambini-robot hanno contribuito a rispondere ad alcune domande chiave della psicologia, tra cui l'importanza dell'elaborazione predittiva e della dimensione corporea nello sviluppo cognitivo. «Abbiamo imparato molto su come funzionano i sistemi complessi, sull'importanza del corpo e su cose davvero fondamentali come l'esplorazione e la previsione», dice Smith.

Tuttavia i robot in grado di sviluppare un'intelligenza simile a quella umana sono ben lontani dall'essere realizzati: Chappie appartiene ancora al mondo della fantascienza. Per cominciare, la scienza deve superare ostacoli di ordine tecnico, come la fragilità dei corpi e i limiti delle capacità sensoriali della maggior parte dei robot. (A questo fine possono contribuire i passi avanti in aree come la *soft robotics* e la visione robotica.) Difficoltà molto più serie emergono dall'incredibile complessità del cervello stesso. Nonostante da molte parti ci si impegni a modellare la mente umana, gli scienziati sono ben lontani dal costruire una macchina in grado di rivaleggiare con essa. «Mi trovo completamente in disaccordo con chi dice che tra dieci o vent'anni avremo macchine dotate di un'intelligenza di livello umano», afferma Oudeyer. «Credo che un'affermazione del genere dimostri un profondo fraintendimento di quella che è la complessità dell'intelligenza umana».

Inoltre, per l'intelligenza non basta avere macchinari e circuiti giusti. Un consolidato filone di ricerca ha dimostrato che gli educatori sono cruciali nello sviluppo dei bambini. «Se mi chiedete se un robot possa davvero diventare simile a un essere umano, io vi chiedo se qualcuno può davvero prendersi cura di un robot come di un bambino», spiega Tani. «Se ciò è possibile, allora sì, potremmo arrivarci, ma altrimenti è impossibile pretendere che un robot si sviluppi davvero come un piccolo essere umano».

La tendenza a ridurre l'errore di previsione può di per sé indurre un comportamento sociale di base nei robot

Potrebbe essere indispensabile anche il processo con cui si accumulano gradualmente le conoscenze. «Lo sviluppo è un sistema a cascata molto complesso», afferma Smith. «Ciò che avviene un giorno forma le basi per il giorno successivo». Di conseguenza, sostiene, forse non è possibile costruire un'intelligenza artificiale di livello umano senza integrare in qualche modo quel processo di apprendimento graduale che continua nel corso di tutta la vita.

Poco prima di morire, Richard Feynman scrisse la seguente frase, ormai diventata famosa: «Quello che non riesco a creare, non lo saprò mai capire». Nel suo libro del 2016 *Exploring Robotic Minds*, Tani rovescia il concetto e afferma: «Posso capire ciò che riesco a creare». Il modo migliore per capire la mente umana, sostiene, è realizzarne una sintetica.

Un giorno gli esseri umani potrebbero riuscire a realizzare un robot che sappia esplorare, adattarsi e svilupparsi proprio come un bambino, magari completo di educatori surrogati che gli offrano l'affetto e l'orientamento necessari per una crescita salutare. Nel frattempo i bambini-robot continueranno a darci indicazioni utili e importanti su come imparano i bambini umani, e a rivelare che cosa può succedere quando i meccanismi di base smettono di funzionare correttamente. ■

PER APPROFONDIRE

Developmental Robotics: From Babies to Robots. Cangelosi A. e Schlesinger M., MIT Press, 2015.

Exploring Robotic Minds: Actions, Symbols, and Consciousness as Self-Organizing Dynamic Phenomena. Tani J., Oxford University Press, 2016.

How Evolution May Work through Curiosity-Driven Developmental Process, Oudeyer P.Y. e Smith L.B., in «Topics in Cognitive Science», Vol. 8, n. 2, pp. 492-502, aprile 2016.

Metallo bipede. Pavlus J., in «Le Scienze» n. 577, settembre 2016.

AMBIENTE

Il clima artico supera un record dopo l'altro, e questo altera

di Jennifer A. Francis

le condizioni meteorologiche a livello globale

Alcuni iceberg staccatisi dal ghiacciaio Jakobshavn, in Groenlandia, passano davanti alla città di Ilulissat sotto il Sole di mezzanotte.

Jennifer A. Francis è professoressa e ricercatrice al Dipartimento di scienze marine e costiere della Rutgers University dal 1994. È specializzata in cambiamenti climatici nell'Artico e nei loro effetti sulle condizioni meteorologiche in tutto il mondo.

Nel 2003, durante un raduno della National Science Foundation a Big Sky, in Montana, un gruppo di 25 scienziati di cui facevo parte aveva avuto un'illuminazione riguardo alla regione artica. Prima di allora, anche se tutti studiavamo le zone artiche, ciascuno di noi si era concentrato sul proprio ristretto ambito di ricerca, ma in quel raduno, mettendo in comune le nostre prospettive, ci eravamo resi conto di qualcosa di spaventoso: i cambiamenti che ciascuno di noi aveva individuato separatamente erano collegati tra loro, si accordavano perfettamente gli uni agli altri. Tutto il sistema artico era avviato verso un nuovo stato di precarietà. E la speranza di fermare il cambiamento sembrava già lontana.

In seguito avevamo pubblicato un articolo con una conclusione incredibile e controversa: a quel ritmo di cambiamento, era realisticamente possibile che nel giro di un secolo avremmo visto l'Oceano Artico completamente privo di ghiacci in estate, una situazione che non si verifica da migliaia di anni. Oggi sono di nuovo turbata, perché sembra che probabilmente l'oceano sarà libero dai ghiacci entro il 2040, ben 60 anni in anticipo rispetto a quanto avessimo previsto poco più di dieci anni fa.

L'Artico sta cambiando proprio come si aspettavano gli scienziati, ma a un ritmo più veloce rispetto anche alle previsioni più pessimistiche. L'andamento recente è senza precedenti: in appena tre anni sono stati superati quelli che per decenni erano stati i record per oltre una decina di parametri climatici, tra cui la scomparsa della banchisa in estate, la riduzione della banchisa in inverno, l'aumento della temperatura dell'aria e il disgelo del terreno.

Questi andamenti suggeriscono un pericolo per gli esseri umani in tutto il mondo. L'ultima volta che l'Artico è stato di poco più caldo di oggi, circa 125.000 anni fa, il livello degli oceani era di 4-6 metri più alto. Sparirebbero Miami, New Orleans, gran parte di New York e della Silicon Valley, come pure Venezia, Londra e Shanghai. Nuovi studi indicano che il rapido riscaldamento dell'Artico tende anche a deviare la corrente a getto in modo da far sì che gli eventi meteo estremi permangano più a lungo su Nord America, Europa centrale e Asia, il che porterebbe milioni di persone a subire ondate di calore inesorabili, siccità e temporali implacabili. Il plancton è in aumento in tutto l'Oceano Artico meridionale, un andamento che potrebbe perturbare le catene alimentari che sostengono la pesca commerciale, e a sud della Groenlandia il disgelo massiccio causa un afflusso di acqua dolce così

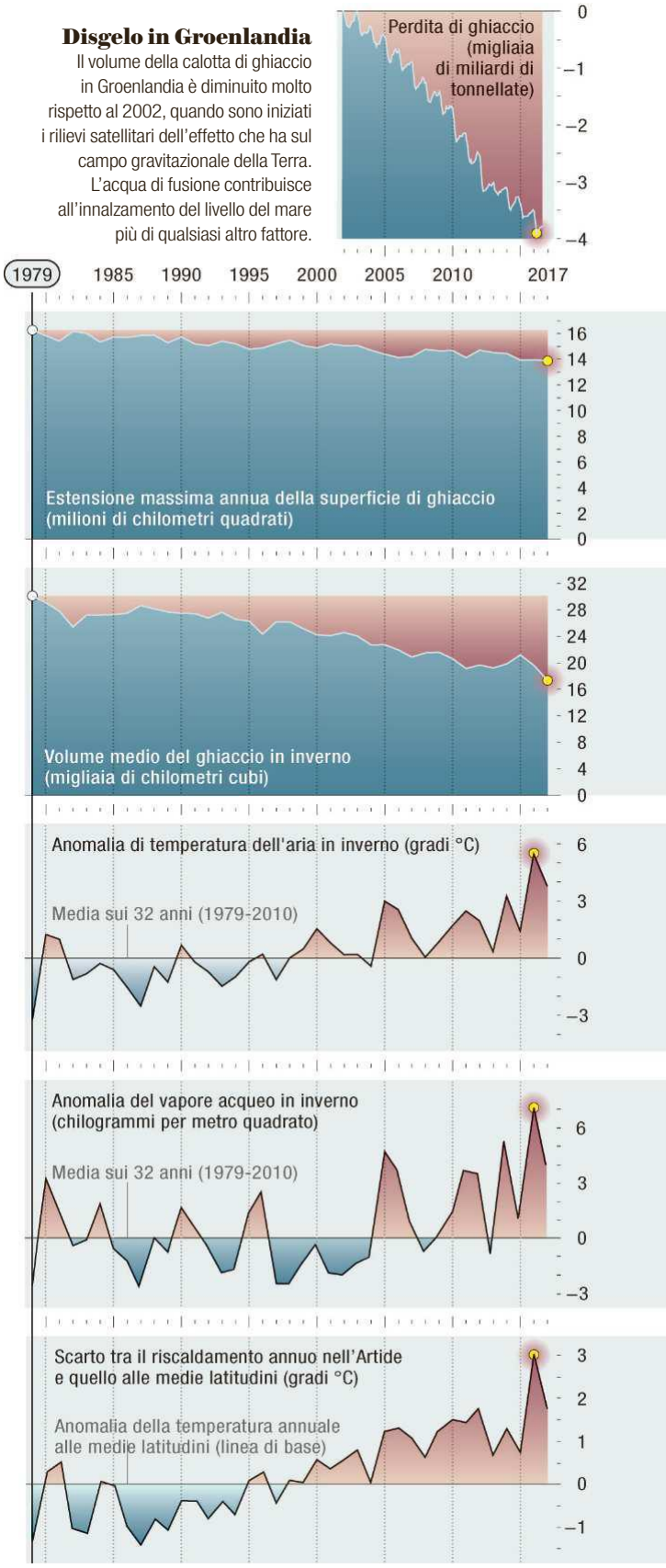
IN BREVE

Il clima artico sta cambiando rapidamente e negli ultimi tre anni ha segnato nuovi record su oltre una decina di parametri importanti.
Il ghiaccio marino sta scomparendo, la temperatura dell'aria aumenta, il permafrost è in disgelo e i ghiacciai si sciolgono.
Questo riscaldamento rapido sta modificando la corrente a getto e il vortice polare, prolungando così le ondate di caldo e di freddo, le siccità e le piogge torrenziali in tutto il mondo.

Pagine precedenti: Getty Images

Disgelo in Groenlandia

Il volume della calotta di ghiaccio in Groenlandia è diminuito molto rispetto al 2002, quando sono iniziati i rilievi satellitari dell'effetto che ha sul campo gravitazionale della Terra. L'acqua di fusione contribuisce all'innalzamento del livello del mare più di qualsiasi altro fattore.

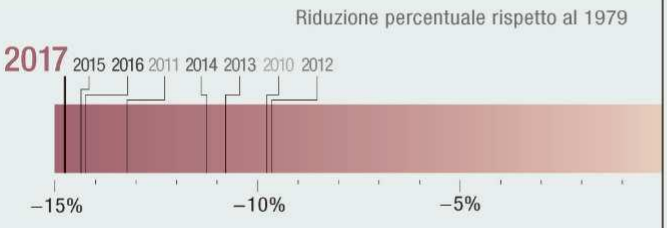


Artico da record

La regione artica sta cambiando drasticamente, e questa rapida trasformazione influirà sulla vita di miliardi di persone in tutto il mondo. Solo negli ultimi tre anni, nel profondo Nord sono stati superati i record per molti parametri relativi al clima, in alcuni casi con margini incredibili. Qui mostriamo sei esempi notevoli.

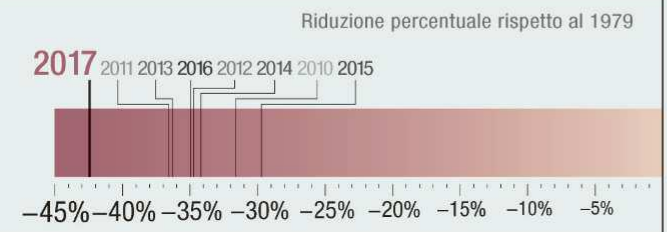
I numeri in rosso nei grafici a barre indicano i record assoluti; i valori registrati in anni recenti riflettono una tendenza verso questi eccessi. Presi singolarmente, gli effetti di questi parametri modificano l'ambiente e la vita quotidiana di chi vive nella zona. Considerati nel loro insieme, gli effetti stanno rimodellando il clima di tutto l'emisfero settentrionale, culminando nell'amplificazione artica (*ultimo grafico*), che aumenta la probabilità di condizioni climatiche estreme tutto l'anno.

Valore nel 1979



Estensione della banchisa in inverno

Via via che l'inverno diventa più freddo, il ghiaccio si estende a coprire l'Oceano Artico, ma l'estensione massima di questa banchisa sta diminuendo in modo costante, soprattutto sul Mare di Barents e sullo Stretto di Bering. Una copertura di ghiaccio minore significa che l'oceano può trasferire in atmosfera più calore e umidità, alterando in modo significativo il clima artico.

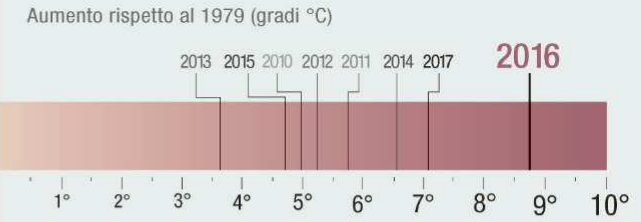


Volume della banchisa in inverno

Nel 2017 la quantità di ghiaccio che galleggiava sopra l'Oceano Artico è scesa di un incredibile 42,5 per cento rispetto al 1979. I venti riescono a spostare più facilmente i ghiacci sottili, intrappolando navi e comunità costiere. Inoltre, essendo più sottile, il ghiaccio si scioglie più rapidamente in estate; il volume estivo della banchisa è crollato dell'80 per cento nello stesso periodo.

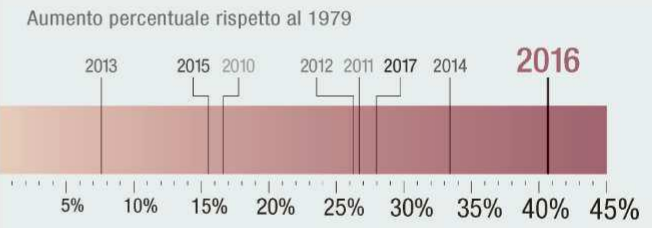
Temperatura dell'aria in inverno

In certi giorni le temperature nell'Artico possono arrivare a 20 gradi al di sopra della norma, e ormai restano alte per tutto l'inverno. Nel 2016 la temperatura media invernale è stata di quasi 9 gradi più alta che nel 1979. Questa tendenza può indebolire la corrente a getto, portando ondate di freddo gelido e neve negli Stati Uniti, in Europa e in Asia.



Vapore acqueo in inverno

Dato che c'è meno copertura di ghiaccio, la superficie dell'oceano immette in aria una maggiore quantità di umidità. Basta un piccolo aumento per causare conseguenze enormi e sottovalutate: il vapore acqueo è un gas serra che intrappola il calore e si condensa in nubi rilasciando il calore latente. Anche le nubi possono aumentare il riscaldamento.



Amplificazione artica

Il riscaldamento nell'Artico è più rapido che nel resto del mondo. Questa «amplificazione» significa che la temperatura media nell'Artico si sta avvicinando a quella delle medie latitudini. Questo progressivo avvicinamento rallenta la corrente a getto durante tutto l'anno, aumentando in tutto l'emisfero settentrionale la probabilità di fenomeni atmosferici estremi e duraturi come ondate di calore e di freddo, inondazioni e forse anche uragani che perdurano più a lungo.

Fonti: JPL GRACE Mascon Ocean, Ice, And Hydrology Equivalent Water Height RL05m.1 Cri Filtered Version 2, D.N. Wiese, D-N. Yuan, C. Boening, F.W. Landerer e M.M. Watkins. PO.DAAC, JPL, 29 aprile 2016. Dati consultati il 14 febbraio 2018 (*ghiaccio in Groenlandia*); Japan's National Institute of Polar Research e JAXA (*estensione della banchisa*); PIOMAS, Polas Science Center (*volume della banchisa*); NCEP/NCAR Reanalysis 1, Physical Sciences Division, ESRL, NOAA (*temperatura dell'aria, anomalia del vapore acqueo e dati sull'amplificazione*)

grande che potrebbe rallentare la corrente del Golfo, un'eventualità che a sua volta potrebbe modificare le condizioni meteorologiche continentali su entrambi i lati dell'Oceano Atlantico.

Che cosa c'è dietro questo cambiamento rapidissimo?

Perdita dei ghiacci «perenni»

Gli scienziati dedicano tante energie a studiare l'Artico perché è estremamente sensibile ai cambiamenti climatici. È la cartina al tornasole per l'intero sistema climatico della Terra. La lunga lista di parametri per cui sono stati superati i record negli ultimi anni non lascia dubbi sul fatto che le inquietanti simulazioni climatiche realizzate negli ultimi decenni siano accurate. Ma i dati ci dicono anche qualcosa di più: forse siamo stati troppo prudenti nelle proiezioni di quelli che saranno i cambiamenti futuri.

In appena quarant'anni l'estensione della banchisa sull'Oceano Artico in estate si è ridotta della metà. Anche il volume della banchisa presente tutto l'anno si è ridotto di molto, e oggi è circa un quarto di quello che era all'inizio degli anni ottanta. Fino a poco tempo fa, la scienza riteneva che questi livelli estremi si sarebbero raggiunti non prima della metà di questo secolo.

La banchisa estiva sta scomparendo velocemente a causa dei *feedback*, circoli viziosi che possono amplificare un cambiamento minimo. Per esempio, quando un eccesso di calore fa sciogliere il ghiaccio, che è bianco, rimane più esposta la superficie dell'oceano, che è scura e riflette meno energia solare verso lo spazio. Il calore assorbito in questo modo riscalda ancora di più l'area, causando lo scioglimento di altro ghiaccio, il che porta a un ulteriore riscaldamento. In inverno, quando non c'è il Sole, intervengono altri feedback. Per esempio, la banchisa che galleggia sulle acque dell'Oceano Artico agisce come una coperta isolante e impedisce che calore e umidità sottostanti siano liberati nell'atmosfera. Quando l'estensione dei ghiacci si riduce, una maggiore quantità di calore e di umidità riscalda l'aria, ritardando ulteriormente la formazione del ghiaccio. In genere le simulazioni al computer mostrano la scomparsa del ghiaccio a ritmi troppo lenti, il che contribuisce alle stime prudenti sul riscaldamento futuro.

Nell'Artico si sta verificando il cambiamento climatico più drastico della storia dell'uomo

La riduzione della banchisa non è l'unico cambiamento che toglie il sonno agli scienziati come me. Nell'Artico stanno sparendo rapidamente anche gli altri due tipi di quello che un tempo si chiamava ghiaccio perenne.

Il permafrost, terreno che in genere rimane ghiacciato per tutto l'anno, si sta sciogliendo. Crollano gli edifici costruiti sul permafrost, cadono gli alberi, cedono le strade. Oltre a complicare la vita dei residenti, questo disgelo del terreno può liberare in atmosfera grandi quantità di gas serra, perché quando si scongela la materia organica che è rimasta rinchiusa nel permafrost per migliaia di anni, i batteri la decompongono in anidride carbonica (in presenza di ossigeno) o metano (in assenza di ossigeno). Il permafrost artico contiene circa il doppio del carbonio presente oggi in atmosfera, quindi uno scioglimento generalizzato potrebbe aumentare di molto il riscaldamento globale, il che a sua volta porterebbe a un disgelo ancora più rapido. I modelli disponibili non considerano in modo adeguato l'impatto dello scioglimento del permafrost, il che ancora una volta contribuisce a una valutazione troppo prudente del futuro del riscaldamento globale.

Il terzo tipo di ghiaccio artico che in passato era perenne è l'acqua ghiacciata al di sopra delle terre emerse, come i ghiacciai e l'immensa calotta di ghiaccio della Groenlandia, con uno spessore di più di un chilometro e mezzo. La perdita di questi ghiacci ha conseguenze catastrofiche in tutto il mondo perché, al contrario di quello che avviene con lo scioglimento della banchisa, l'acqua che ne defluisce alimenta l'oceano e fa salire direttamente il livello del mare. Nell'estate 2016 la massa totale della calotta di ghiaccio in Groenlandia (stimata con rilievi satellitari del suo effetto sulla gravità terrestre) ha raggiunto i minimi storici da quando sono iniziate le misurazioni satellitari nel 2002. I livelli attuali sono anche i più bassi registrati dalla fine degli anni cinquanta, quando la massa di ghiaccio era misurata in altri modi. Una recente ricerca ha ipotizzato che l'accelerazione nello scioglimento dei ghiacci di superficie in Groenlandia sia favorita dagli effetti del riscaldamento legato alla riduzione della banchisa.

Aria più calda e più umida

La riduzione della banchisa e il rapido riscaldamento dell'Artico hanno anche altri effetti ad ampio raggio. La combinazione di questi due fattori può alterare i venti di alta quota in modo che portino una maggiore quantità di calore e umidità dalle latitudini più meridionali verso il Polo Nord. Lo scioglimento dei ghiacci in Groenlandia nel 2012, a un livello che all'epoca era da record, era dovuto a un'espansione di alta pressione atmosferica insolitamente forte e duratura, un cosiddetto anticiclone di blocco, che trasportava non solo calore e umidità da sud, ma anche la fuliggine degli incendi dell'emisfero settentrionale. La fuliggine rende scura la superficie di ghiaccio e neve (riducendone l'albedo, o riflettività), che di conseguenza assorbono una maggior quantità di energia solare, accelerando il disgelo: un altro circolo vizioso.

Sembra che le situazioni di blocco (grandi turbolenze nella corrente a getto) nei dintorni della Groenlandia si verifichino più spesso negli ultimi decenni, soprattutto nei mesi estivi, il che probabilmente spiega almeno in parte l'aumento del disgelo. La perdita di volume di ghiaccio nell'estate 2016 si classifica al terzo posto da quando abbiamo dati in merito, dietro a quelle del 2010 e 2012. Nuovi studi condotti da me e dai miei colleghi indicano che molto probabilmente l'aumento del numero di anticicloni di blocco è collegato al riscaldamento globale. Tuttavia le simulazioni faticano ad analizzare in modo realistico le situazioni di blocco, quindi è difficile prevedere come questo fenomeno possa evolversi in futuro.

Altri fenomeni climatici nelle zone artiche sono altrettanto bizzarri. Negli ultimi due inverni nei pressi del Polo Nord si sono verificate varie ondate di calore che ogni volta superavano i record precedenti. Una delle cause è data dal declino e dall'assottigliamento della banchisa, dato che questo implica una minore barriera all'ingresso del calore oceanico nell'atmosfera. Anche le estreme oscillazioni nord-sud nella corrente a getto hanno portato iniezioni di calore e di umidità a latitudini molto più settentrionali. Spesso i ricercatori e i residenti delle zone artiche non si rendono conto di quanto siano forti gli effetti di quell'umidità in più. Tanto per cominciare, il vapore acqueo è un gas serra, quindi nell'atmosfera asciutta dell'inverno artico basta poca umidità extra per trattenere una quantità sostanziale di calore in più. Inoltre, quando il vapore acqueo si condensa in nubi rilascia calore latente, che riscalda ulteriormente l'aria, infine più nubi trattengono sotto di loro una maggior quantità di calore, il che è un ennesimo fattore che contribuisce al disgelo dell'Artico.

La calotta di ghiaccio si scioglie nelle Svalbard, in Norvegia, e l'acqua che deriva dalla fusione si riversa nel mare.

Getty Images

Senza mezze misure

Anche se c'è ancora molto da scoprire, ormai è chiaro che nell'Artico si sta verificando un cambiamento rapido, il più drastico della storia dell'uomo. Data la gravità della situazione, gli scienziati che studiano l'atmosfera cercano di determinare quali effetti possa avere questo cambiamento sulle persone e sugli ecosistemi di tutto il mondo, in modo che la società possa decidere come reagire e prepararsi per il futuro.

Un esempio evidente degli effetti a livello globale sono le inondazioni costiere. Secondo un rapporto della Union of Concerned Scientists, circa 170 comunità costiere negli Stati Uniti saranno soggette a inondazioni croniche nei prossimi vent'anni e, se le nazioni manterranno le emissioni di anidride carbonica ai livelli attuali, entro fine secolo la maggior parte delle grandi città costiere di tutto il mondo sarà soggetta a inondazioni regolari e destabilizzanti. Questo rapporto sinistramente lungimirante è stato pubblicato qualche settimana prima che arrivassero gli uragani Harvey, Irma e Maria, a coronamento di quella che per gli Stati Uniti è stata la stagione di uragani più distruttiva e costosa di tutti i tempi.

Stanno aumentando anche le prove che un forte riscaldamento della bassa atmosfera nell'Artico può influenzare i venti della corrente a getto, anche a quote più levate, nella stratosfera, dove attorno alla zona artica soffiano i venti del vortice polare. Le ondulazioni nel percorso della corrente a getto, con picchi verso nord e depressioni verso sud, generano centri di alta e bassa pressione che sulle mappe meteo sono indicati con le lettere A (o H) e B (o L) . Sono queste ondulazioni che controllano il clima nell'emisfero settentrionale, ma se le ondulazioni particolarmente accentuate diventano più frequenti possiamo prevedere anche un aumento degli eventi meteorologici estremi in regioni abitate da miliardi di persone. Ciò è dovuto al fatto che le ondulazioni più accentuate della corrente a getto tendono a spostarsi più lentamente da ovest a est e di conseguenza anche gli eventi climatici da esse generati durano più a lungo nello stesso posto. Parliamo di ondate di calore prolungate, piogge inarrestabili e tempeste tropicali che rimangono stazionarie come l'uragano Harvey, che ha inondato Houston ad agosto 2017, ma anche di stagioni degli incendi più intense, come quella in California lo scorso anno.

Grandi alterazioni nella corrente a getto abbinate a un forte riscaldamento nell'Artico possono perturbare il vortice polare, prolungando ondate di gelo mortali o di tempeste di neve, come il lungo periodo di freddo intenso nel nord degli Stati Uniti a gennaio di quest'anno. Il collasso del vortice polare può anche prolungare quelle oscillazioni estreme della corrente a getto che portano ondate di calore impressionanti in Alaska e nell'estremo nord, creando ancora un altro circolo vizioso che accelera il riscaldamento delle zone artiche. Alcuni studi suggeriscono che il riscaldamento dell'Artico sia collegato a queste oscillazioni, altri sostengono che le prove del collegamento siano ancora deboli. La ricerca sull'argomento è intensa e avanza rapidamente.

È molto probabile che un riscaldamento rapido dell'Artico alteri gli habitat terrestri e marini. Con la riduzione della banchisa sono già apparse fioriture (*bloom*) di plancton in zone nuove e durante stagioni nuove, il che attira nell'Oceano Artico specie di pesci provenienti da latitudini meridionali, mentre le specie autoctone scompaiono. Dato che lo scioglimento delle nevi in primavera alle latitudini più settentrionali è sempre più precoce, la tundra diventa verde prima, e anche la schiusa degli insetti avviene in anticipo; gli uccelli migratori, che si basano su quante ore di luce ci sono in un giorno per decidere quando spostarsi, potrebbero arrivare nei luoghi artici in cui si cibano troppo tardi per partecipare al banchetto. Anche le popolazioni umane ne subiscono gli effetti; il disgelo impedisce di raggiungere le tradizionali aree di caccia e addirittura obbliga a sradicare cittadine minacciate dall'erosione dovuta alle alte onde di tempesta in zone dove in passato la costa era protetta dal ghiaccio. Allo stesso tempo grandi nazioni e grandi aziende mirano ad appropriarsi di risorse naturali che sono diventate accessibili, e aumentano le tensioni su come spartirsi un fondale marino ampio e ricco.

L'illuminazione che abbiamo avuto al raduno di Big Sky mi torna in mente ogni volta che un nuovo evento climatico prolungato causa danni o che nell'Artico si supera un record. Se ne stanno accorgendo anche i miei vicini di casa; i sondaggi indicano che la maggior parte degli statunitensi crede che la riduzione dei ghiacci artici e la corrente a getto (diventata rapidamente un termine familiare) stiano unendo le forze per creare un clima insolito. L'Artico del passato era magari spietato, ma stabile. Questa nuova versione è meno prevedibile, e forse sta cambiando in modi irreversibili, con effetti a cascata sulla vita in tutto il mondo.

È ancora possibile evitare questi effetti? Sì e no. Dato che la risposta del clima avviene in ritardo rispetto all'aumento della concentrazione di gas serra e che l'anidride carbonica rimane in atmosfera per un periodo lunghissimo, i cambiamenti futuri sono già inglobati nel sistema. Però è possibile ridurne ampiezza e velocità, se la società si muoverà rapidamente nel limitare le emissioni e se verranno sviluppati modi per estrarre grandi quantità di carbonio dall'atmosfera. Il progresso su entrambi i fronti avanza rapido, ma probabilmente sarà insufficiente e tardivo per conservare la Terra e l'Artico come li conoscevamo. Preparatevi all'ignoto. ■

PER APPROFONDIRE

Arctic Matters: The Global Connection to Changes in the Arctic. National Research Council, National Academies Press, 2015.

Amplified Arctic WarOming and Mid-latitude Weather: New Perspectives on Emerging Connections. Francis J.A., Vavrus S.J. e Cohen J., in «WIREs Climate Change», Vol. 8, n. 5, articolo n. e474, settembre-ottobre 2017.

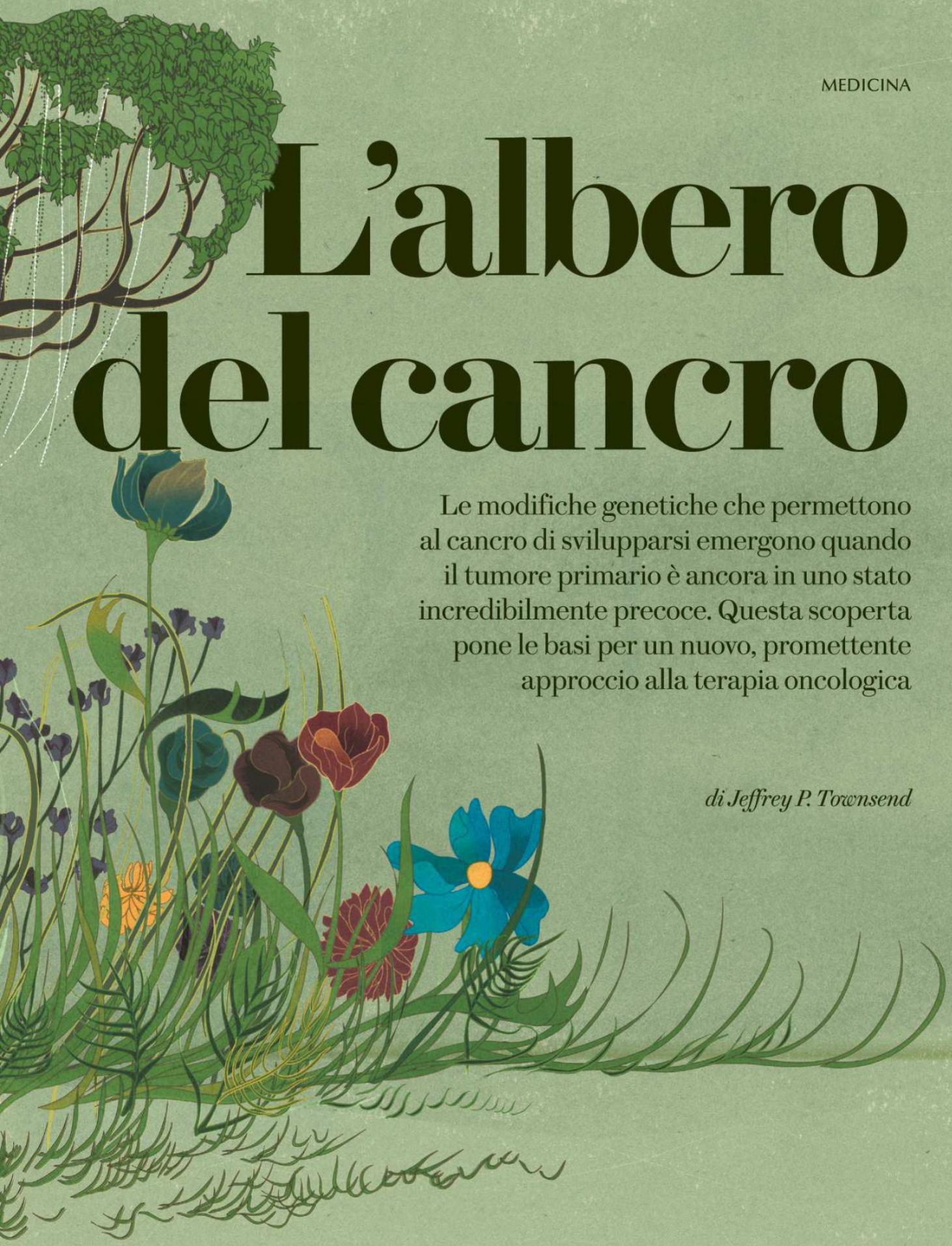
Gli strani percorsi della corrente a getto. Masters J., in «Le Scienze» n. 558, febbraio 2015.

Illustrazione di Marcos Chin

L'albero del cancro

Le modifiche genetiche che permettono al cancro di svilupparsi emergono quando il tumore primario è ancora in uno stato incredibilmente precoce. Questa scoperta pone le basi per un nuovo, promettente approccio alla terapia oncologica

di Jeffrey P. Townsend



Jeffrey P. Townsend è professore associato di biostatistica alla Yale School of Public Health e di ecologia e biologia evolutiva alla Yale University.

Da molto tempo i biologi studiano i geni per comprendere la storia delle ramificazioni dell'albero della vita, che collega tutti gli esseri viventi della Terra, che siano uistitì o microbi. Una foglia di questo rigoglioso albero ancestrale, nascosta tra i rami dei primati, rappresenta *Homo sapiens*. Ogni individuo della nostra specie è un aggregato di cellule che cooperano per generare il nostro organismo.

Normalmente le cellule rispettano un accordo, emerso per tentativi ed errori tra le prime forme di vita multicellulare più di 600 milioni di anni fa. Questo accordo stabilisce che se le cellule vivono insieme allora devono seguire le seguenti regole di base: riparare il proprio DNA quando è danneggiato, consultare le cellule vicine per valutare la possibilità di dividersi, e rimanere nel tessuto di loro competenza. In genere le mutazioni che spingono le cellule a violare queste restrizioni e a cominciare a crescere e diffondersi senza sosta – come accade nei tumori maligni – sono annientate grazie alla morte programmata. Le cellule mutate rilevano i propri problemi e si suicidano oppure sono soppresse dal sistema immunitario prima che possano causare danni.

A volte però si accumulano mutazioni contro le quali il sistema di sorveglianza cellulare è inefficace, così i tumori crescono e si diffondono. Un albero evolutivo maligno germoglia dentro l'organismo.

I ricercatori sanno che alcune mutazioni sono determinanti per l'oncogenesi, cioè la formazione del tumore iniziale. A rendere il cancro particolarmente letale, tuttavia, è la metastasi, cioè la fuga di cellule malate dal tumore primario verso tessuti ancora sani, in cui si insediano per generare nuovi tumori. Convinti che la proliferazione delle metastasi dipendesse da ulteriori mutazioni, e che queste si verificassero relativamente tardi nella storia del tumore primario, spesso gli oncologi cercavano di identificarle e di aggredirle con i farmaci.

Intorno al 2010, però, i progressi tecnologici hanno permesso agli scienziati di sequenziare a costi contenuti l'intero genoma umano (ovvero di determinare l'ordine delle basi che compongono il DNA). Gruppi di ricercatori di varie istituzioni hanno iniziato a studiare in modo approfondito le sequenze genetiche dei tumori. Con sgomento hanno scoperto che spesso, addirittura in uno stesso paziente, il tumore conteneva una sconcertante varietà di mutazioni.

Tuttavia, per biologi evolutivi come me questa varietà è una fonte di informazioni preziose. Insieme a colleghi della Yale University e di altre istituzioni abbiamo deciso di studiare le relazioni di parentela tra le mutazioni. Quindi abbiamo sequenziato le aree espresse dei genomi di alcuni malati di cancro, vale a dire le sezioni di DNA note per controllare la produzione di proteine e di conseguenza determinare le proprietà delle cellule. In seguito abbiamo sfruttato quelle informazioni per disegnare alberi filogenetici delle mutazioni associate alla malattia. Le ramificazioni degli alberi illustrano il cambiamento dei geni nei tumori via via che il tumore cresce da poche cellule a una massa mostruosa in metastasi.

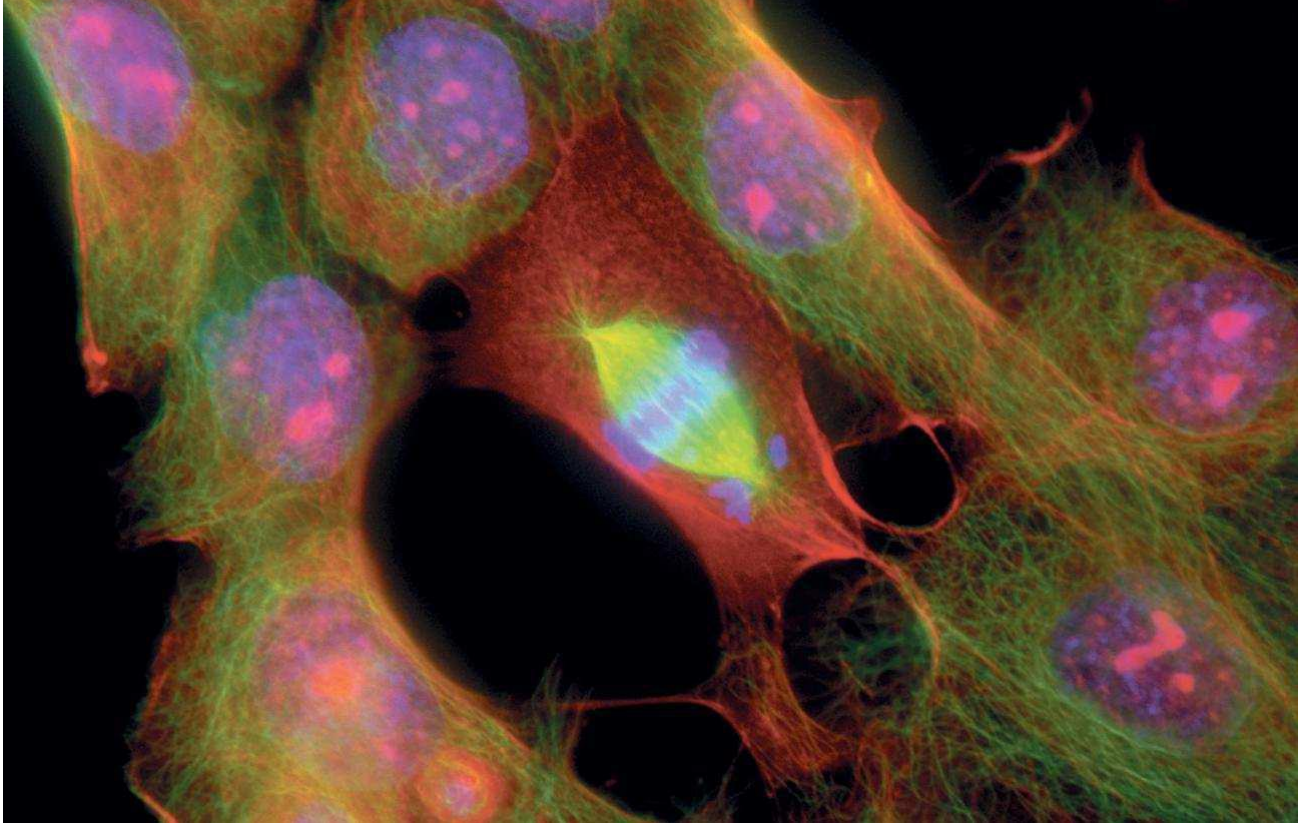
Un groviglio di rami

I nostri studi hanno rivelato che i rami che collegano il tumore primario alle metastasi si propagano diffusamente e in modo apparentemente casuale l'uno dall'altro, come in un mitico albero velenoso. Ancora più sorprendente è il fatto che i primi rami di questo albero evolutivo possono emergere dal profondo del tumore originario. A volte alcune cellule del tumore primario sono pronte a svilupparsi in forme più aggressive — ciascuna con i propri meccanismi genetici di diffusione — già molti anni prima della diagnosi del tumore iniziale.

Queste scoperte sono preoccupanti, ma offrono anche nuove speranze. Implicano che gli oncologi, invece di concentrarsi sul-

IN BREVE

Gli alberi evolutivi delle mutazioni genetiche ricostruiscono lo sviluppo dei tumori e la parentela tra le cellule tumorali di tessuti diversi.
Le mutazioni precoci di alcuni geni driver sembrano responsabili della formazione sia del tumore primario sia delle metastasi.
Le terapie oncologiche mirate contro i geni driver che mutano precocemente potrebbero dimostrarsi le più efficaci.
Gli alberi evolutivi delle mutazioni di singoli pazienti potrebbero indicare possibili strategie contro i tumori resistenti ai trattamenti terapeutici.



Microfotografia in luce polarizzata di cellule metastatiche di un cancro al fegato. Al centro, una cellula in fase di divisione.

le mutazioni successive, dovrebbero preferibilmente studiare i geni che sono alterati nelle fasi precoci del tumore primario, ovvero del seme da cui deriva l'albero filogenetico del cancro. Bersagliare questi geni mutanti con i farmaci potrebbe aumentare le possibilità di guarigione per i pazienti.

Per anni la ricerca sul cancro si è basata su un modello lineare, secondo cui l'oncogenesi deriva da una serie specifica di mutazioni. Solo in un secondo momento, grazie a una o più mutazioni successive, alcune cellule del tumore primario acquisiscono la capacità di metastatizzare. Se si potesse costruire un albero evolutivo per rappresentare queste mutazioni, il grafico somiglierebbe a una tipica pianta erbacea: alta, dritta, con qualche foglia e seme in prossimità della punta.

Questa teoria non quadra con le conoscenze dei biologi evoluzionisti sulla storia delle forme di vita. Le continue mutazioni e la selezione spingono gli organismi a divergere costantemente gli uni dagli altri, generando così una varietà di linee di discendenza genetiche invece di un'unica popolazione omogenea. In realtà, i primi studi di Marco Gerlinger, dell'Institute of Cancer Research di Londra, e di altri colleghi hanno mostrato che addirittura all'interno di uno stesso tumore primario diverse regioni di cellule tumorali avevano sequenze geniche differenti.

Nel 2010 io e alcuni ricercatori del mio laboratorio alla Yale School of Public Health, insieme al patologo David Rimm, al genetista Richard Lifton e al farmacologo Joseph Schlessinger, tutti della Yale School of Medicine, ci siamo proposti di rispondere a tre domande emerse da queste scoperte. Primo: ci sono una o più mutazioni specifiche, presenti in tutti i pazienti, necessarie per la metastasi? Secondo: le linee di discendenza delle metastasi possono divergere relativamente presto nella storia del tumore primario, prima ancora che si accumuli la maggior parte delle mutazioni? Terzo: individuando una varietà di mutazioni nei tumori primari e nelle metastasi, avremmo potuto usare gli alberi filogenetici per calcolare quando queste mutazioni tendono a verificarsi? Rispondendo a questi interrogativi avremmo identificato i percorsi genetici che portano alla nascita del tumore primario e delle sue metastasi.

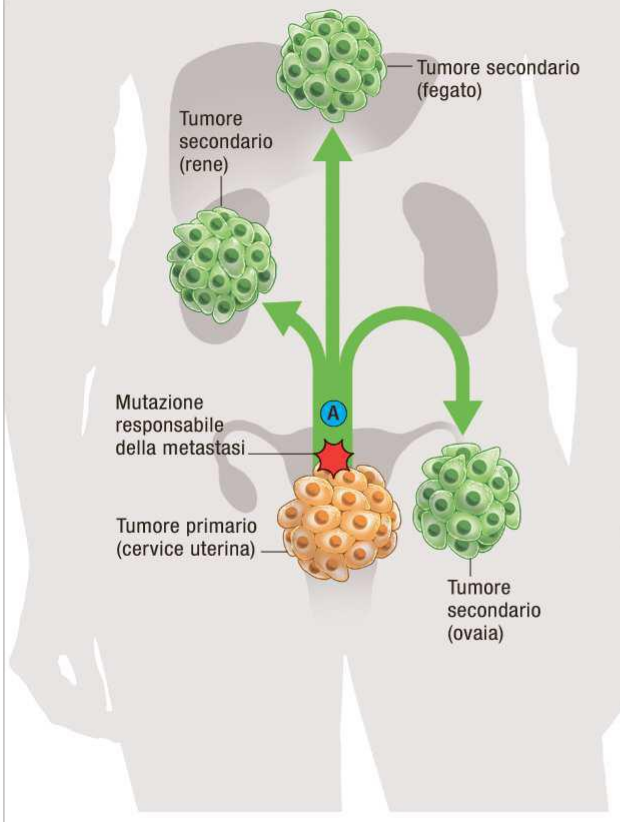
Frutti velenosi

Non avevamo idea di quanto potenti si sarebbero rivelati i nostri strumenti evolutivi. Rimm ha ottenuto tessuti autoptici prelevati da aree sane e da quelle malate di organi interessati da tumori primari e secondari, appartenenti a 40 pazienti deceduti a causa di 13 diversi tipi di cancro. Per ciascun campione, il nostro gruppo ha sequenziato le parti del genoma che sappiamo essere espresse in tutti i tessuti e in qualsiasi momento. I nostri studi hanno rilevato decine, a volte addirittura migliaia di mutazioni che in uno o più campioni di tessuti tumorali differivano rispetto alla sequenza genetica della linea germinale, o normale, del paziente (ereditata da un unico ovulo fecondato).

Per comprendere le relazioni di parentela tra questi campioni Zi-Ming Zhao, che all'epoca lavorava come ricercatrice postdottorato nel mio laboratorio, ha costruito alberi filogenetici molecolari. Questo tipo di grafico è spesso usato per studiare la nostra parentela con scimpanzé, gorilla e orangutan; la parentela tra primati e altri mammiferi; o tra mammiferi e uccelli e altri animali; o ancora tra animali e funghi, vegetali e batteri. Gli scienziati elaborano questi alberi confrontando l'entità delle divergenze tra i tratti (ovvero tra le sequenze di basi del DNA) di organismi appartenenti a specie diverse e cercando lo schema più plausibile in cui ciascuna forma di vita studiata trovi una sua collocazione tra i rami.

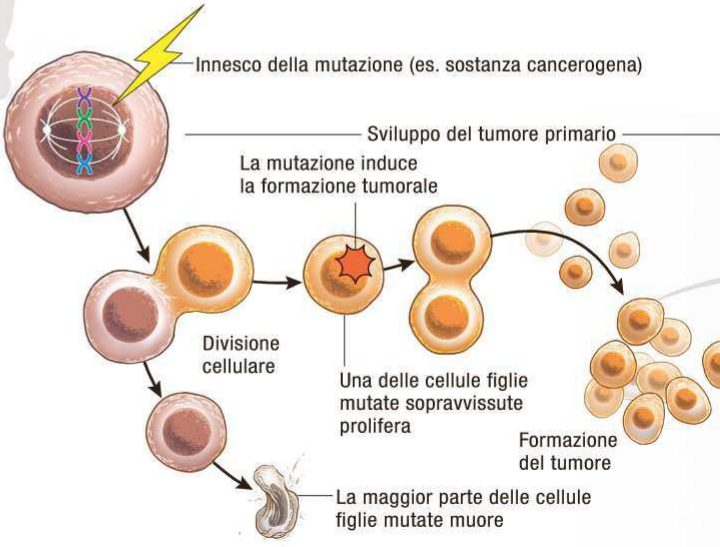
Ma applicare queste tecniche al cancro è difficile. Di norma come dati usiamo solo sequenze che osserviamo oggi e avanziamo ipotesi sugli antenati. Negli alberi filogenetici del cancro, invece, conosciamo la sequenza dell'antenato: è la sequenza della linea germinale ottenuta dal tessuto sano. Se seguiti alla lettera, gli approcci tradizionali ci avrebbero portato a considerare la sequenza normale come una linea «discendente» aggiuntiva, e in questo

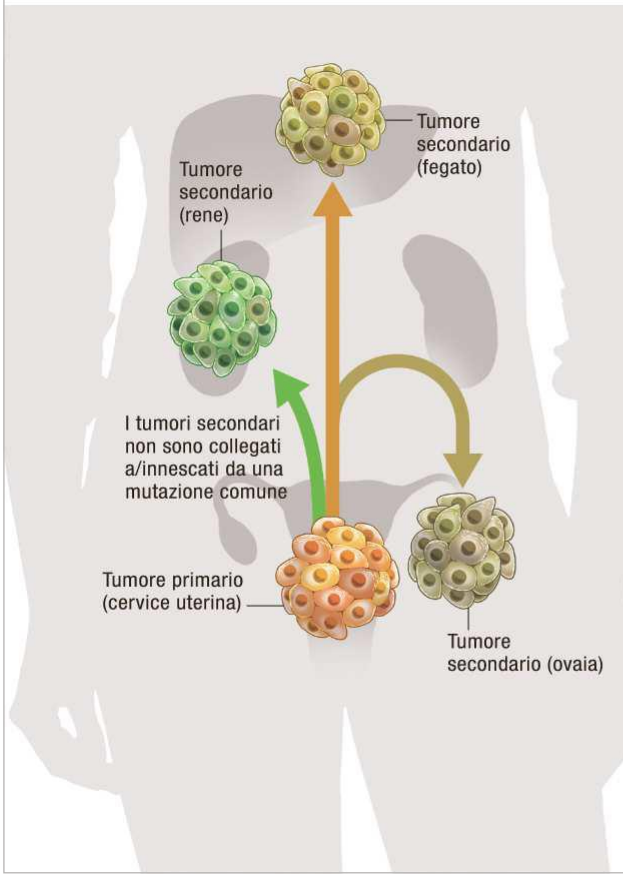
Jennifer C. Waters Science Source

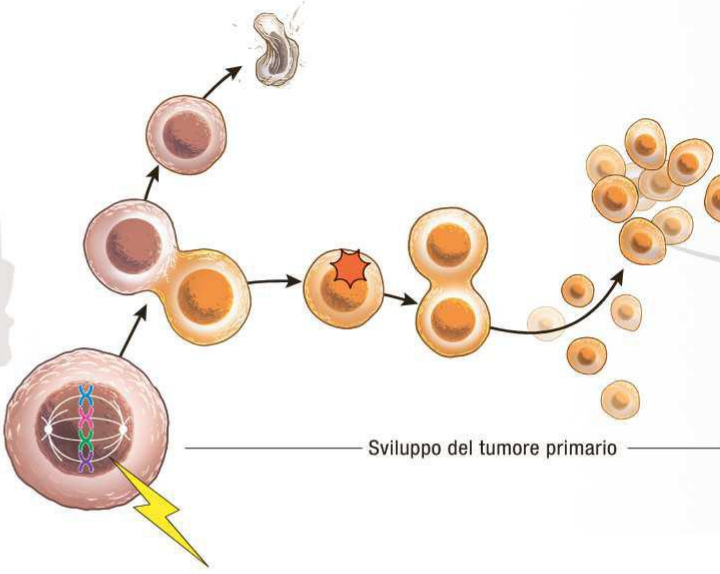


Il modello lineare

Da decenni gli oncologi sono convinti che la formazione tumorale sia stimolata da una serie specifica di mutazioni. Solo in seguito a queste alterazioni alcune cellule del tumore primario subiscono una o più mutazioni successive con cui acquisiscono la capacità di metastatizzare. Per esempio, in un tumore della cervice uterina un'unica mutazione (A) aggiuntiva può avviare la metastasi e la diffusione di cellule tumorali a fegato, reni od ovaie. Secondo il modello lineare, tutti i tumori secondari discendono da una sola linea cellulare (B), uscita dal tumore primario e diffusasi in altre sedi.







Il modello ramificato

Gli alberi evolutivi delle cellule tumorali elaborati dall'autore hanno rivelato che diverse linee genetiche (C) interne al tumore primario portano alla formazione di tumori secondari. Di conseguenza, i tessuti metastatici possono essere imparentati più strettamente con il tumore primario invece che tra loro. Queste scoperte inducono a pensare che gli oncologi, invece di bersagliare i geni ipoteticamente responsabili della metastasi, otterrebbero risultati migliori se si concentrassero sui geni driver che sembrano essere responsabili della formazione sia dei tumori sia delle metastasi.

Lineare o ramificato?

È la metastasi a rendere il cancro particolarmente letale, cioè la fuga di cellule malate dal tumore primario verso tessuti ancora sani. Per molto tempo il modello lineare ha indotto gli oncologi a cercare mutazioni potenzialmente responsabili delle metastasi, per poi aggredirle con le terapie. Gli alberi evolutivi sviluppati dall'autore sulla base di cellule tumorali prelevate da pazienti indicano però che il modello lineare classico non coincide con i dati raccolti. Le metastasi non sono indotte da una o più mutazioni chiave: i rami dell'albero evolutivo del cancro che portano ai tumori secondari germogliano quasi casualmente dal tumore primario. La metastasi non richiede mutazioni specifiche. Queste scoperte indicano che bersagliare i geni responsabili dello sviluppo del tumore stesso potrebbe essere la strategia più efficace nelle terapie oncologiche.

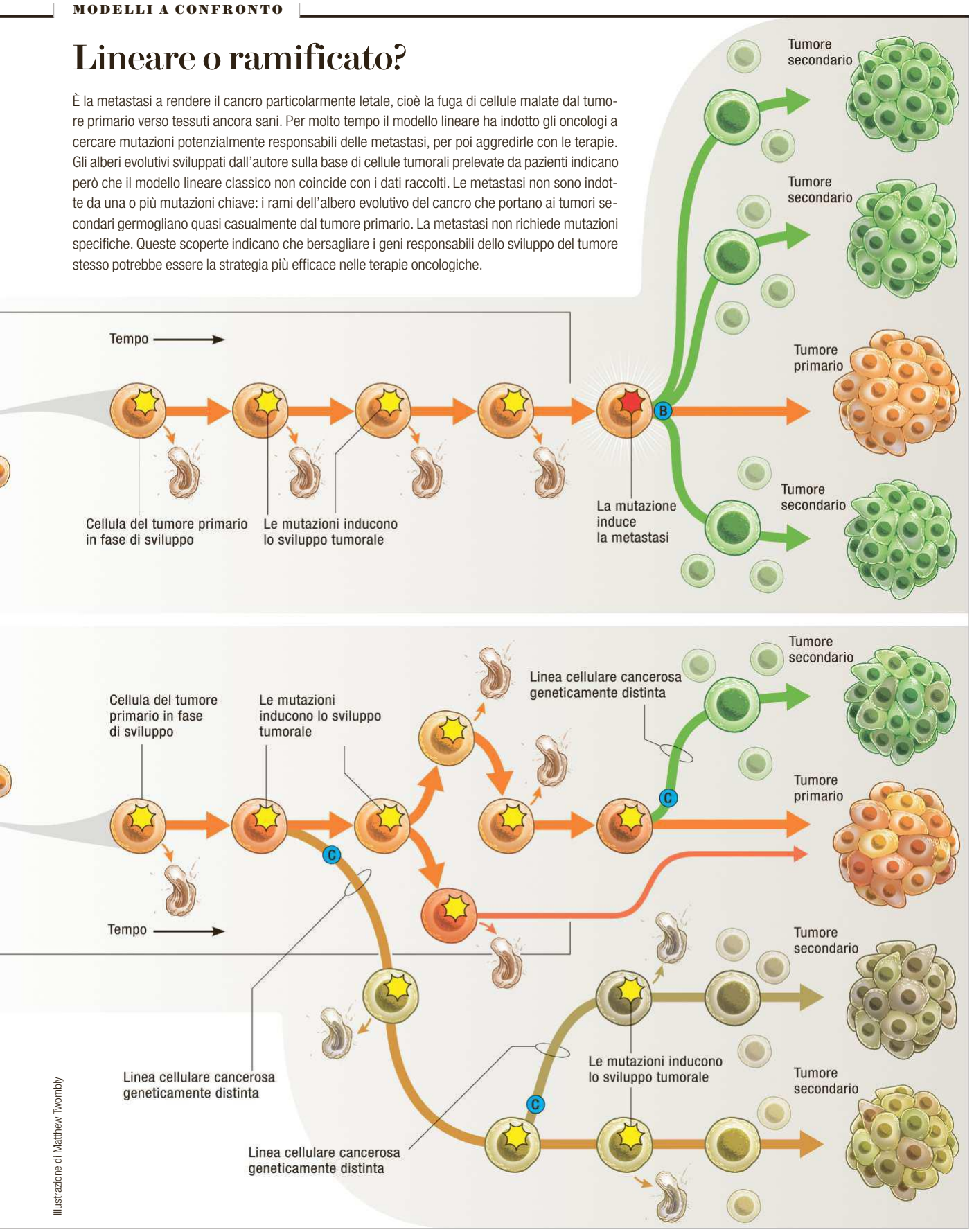


Illustrazione di Matthew Twombly

modo avremmo ottenuto alberi che non riflettevano la storia che stavamo analizzando. Noi abbiamo quindi modificato gli approcci classici, considerando la sequenza genetica del tessuto sano come l'antenato delle linee cellulari primarie e metastatiche, e abbiamo elaborato alberi filogenetici che sembravano più adatti a spiegare la successione delle alterazioni.

Questi alberi riorientati hanno rivelato qualcosa di sorprendente. Secondo il modello lineare a lungo vigente, tutte le metastasi discenderebbero da un'unica linea di cellule uscite dal tumore primario e diffuse in altri siti. Se davvero le metastasi avessero questa origine – se discendessero cioè da una mutazione finale in un'unica serie di cambiamenti del DNA – la sequenza genetica derivante da ciascun tumore secondario dovrebbe essere imparentata più strettamente con quella di altri tumori secondari che non con una qualsiasi parte del tumore primario.

Ma non è quello che abbiamo trovato. Quando abbiamo iniziato a studiare gli «alberi» tumorali, abbiamo notato che in alcuni pazienti il tessuto tumorale primario era strettamente imparentato con alcuni tessuti metastatici ma non con altri. Questo significava che non una ma più linee genetiche del tumore primario erano andate in metastasi. In effetti, questo schema era presente in oltre un terzo dei nostri alberi più rappresentativi e meglio compilati.

Gli oncologi non considerano più ciascun tipo di cancro come una malattia omogenea: ogni caso è un'entità a sé stante

Alberi del tempo

Siamo rimasti stupiti nello scoprire che il modello lineare classico non si adattava ai dati effettivi. Anziché rilevare un evento unico e raro capace di indurre la metastasi, le prove indicavano che la capacità di metastatizzare di una linea cellulare era imputabile a quegli stessi cambiamenti genetici precoci che avevano avviato la proliferazione tumorale.

Inoltre, nelle linee cellulari in metastasi non siamo riusciti a individuare un unico gene responsabile. A parte i principali geni già noti come *driver* dell'oncogenesi (come per esempio *KRAS*, che risulta mutato nei tumori primari di quasi tutti i pazienti di cancro al pancreas), nei tessuti metastatici di numerosi soggetti non c'era un gene mutato specifico. In effetti, le mutazioni rilevate nei rami che portavano ai tumori secondari erano indistinguibili da quelle presenti nelle linee cellulari che non avevano mai lasciato il tumore primario. Più che nella mutazione, probabilmente le cause della metastasi dovevano essere cercate in altri fattori, come i cambiamenti epigenetici (alterazioni nell'espressione genica) nelle cellule tumorali primarie, o le caratteristiche specifiche del loro microambiente.

Le modifiche epigenetiche in un ammasso di cellule tumorali primarie, provocate per esempio dall'esposizione casuale a un agente cancerogeno, potrebbero aumentare la loro propensione a migrare. Anche la posizione di una determinata cellula rispetto ad altre tipologie cellulari può essere rilevante. Per esempio alcune cellule tumorali potrebbero diffondersi nell'organismo semplicemente perché si trovano vicine a un vaso sanguigno o linfatico, a differenza di altre cellule con mutazioni identiche ma più distanti. Questi potenziali fattori di influenza sulle metastasi potrebbero avere poco o nulla a che fare con le mutazioni successive individuate nei nostri alberi evolutivi.

Dopo aver appurato che a volte linee divergenti del tumore primario danno origine a metastasi diverse, ci siamo chiesti quanto sia precoce la divergenza di queste linee metastatiche nell'arco della vita di un paziente. I nostri alberi filogenetici molecolari non rispondono a questa domanda: la lunghezza dei rami non corrisponde al tempo effettivo ma al numero di mutazioni che distinguono parti diverse del cancro, come le masse tumorali primarie e le metastasi. Non ci dicono quanto tempo impiega un tumore a generarne un altro.

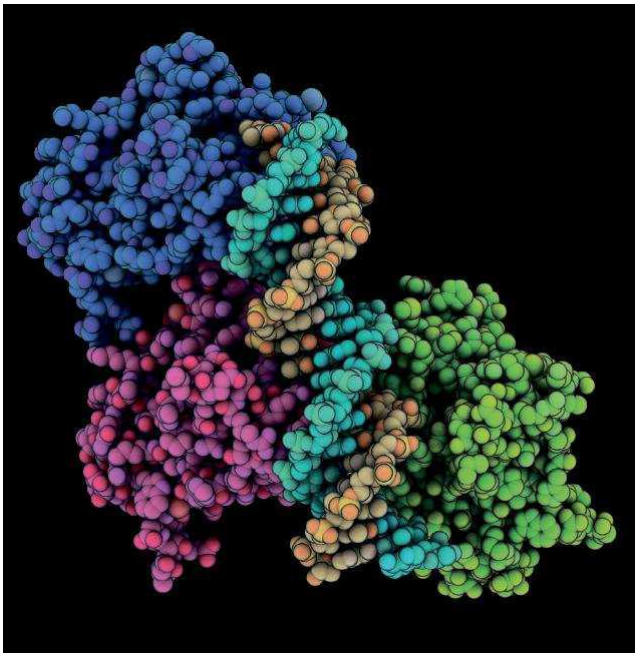
Ci siamo chiesti se fosse possibile prendere in prestito un altro schema dalla biologia evolutiva – il cronogramma – per studiare la storia della progressione del cancro nell'organismo umano. A differenza di quanto accade negli altri alberi filogenetici molecolari, nei cronogrammi la lunghezza di un ramo misura il tempo impiegato da una forma vivente per evolvere in un'altra. Questi grafici, ottenuti confrontando i tratti di interesse (come le sequenze genetiche) e combinandoli con le informazioni temporali (come il tasso di mutazione), permettono agli scienziati di stabilire il momento in cui si verificano i cambiamenti principali. Sono stati impiegati con i fossili, per esempio per svelare la tempistica dell'esplosione del Cambriano, quando svariate forme di vita multicellulari fecero la loro comparsa, quasi 550 milioni di anni fa.

Naturalmente non avevamo reperti fossili per calibrare l'evoluzione del cancro nel corso di una vita umana. Tuttavia, avevamo qualcosa di ancora più utile. Avevamo ottenuto molti tessuti primari asportati prima delle autopsie. Inoltre avevamo le cartelle cliniche di ogni malato, da cui potevamo ricavare le date relative a nascite, diagnosi, biopsie, asportazioni chirurgiche dei tumori e autopsie. Queste date ci sono servite come punti di riferimento. Il cancro non poteva essersi formato prima dell'anno di nascita, per esempio, e doveva già esistere al momento della diagnosi del tumore primario. I tessuti prelevati dalle biopsie e dai tumori asportati ci offrivano istantanee dell'evoluzione del cancro. Le date corrispondenti ci hanno permesso di calcolare il tasso di mutazione. Abbiamo anche avuto accesso a dati pubblicati, messi insieme in passato da radiologi e relativi alle frequenze con cui tipicamente si dividono le cellule nel tumore primario. (I radiologi avevano raccolto queste informazioni per valutare la quantità di radiazioni necessarie a distruggere un tumore con la radioterapia.)

Atila Iamarino, altro ricercatore post-dottorato del mio laboratorio, ha usato quei dati per trasformare i nostri alberi filogenetici molecolari in cronogrammi. Ci siamo fatti così una prima idea del rapporto tra evoluzione del cancro, arco di vita di un malato e periodo di terapia. Per esempio siamo riusciti a stimare quando si erano verificate le prime mutazioni genetiche che differenziavano le cellule tumorali dai tessuti sani. Nei pazienti più giovani, questa divergenza si collocava generalmente pochi anni prima della diagnosi, mentre nei più anziani poteva avvenire anche decenni prima.

Radici profonde

La prima mutazione che distingue geneticamente il tessuto tumorale da quello normale si verificava tipicamente anni – talvolta anche decenni – prima che il cancro fosse diagnosticato. Ancora più inquietante è stato scoprire che a quel punto, in nove persone su dieci, almeno una linea metastatica si era già separata. In sette casi, la divergenza di questo ramo maligno dal tronco



Struttura al computer della proteina p53 (*blu*, *rosso e verde*) legata a una sequenza di DNA (*ciano e giallo-beige*).

era più vicina al momento dell'origine del tumore primario che a quello del decesso del malato.

Queste scoperte ci sono sembrate significative. Le cellule metastatiche possono differenziarsi geneticamente da altre cellule del tumore primario già in una fase precoce del percorso evolutivo e temporale del cancro. Così precoce che spesso la divergenza avviene già prima della diagnosi del tumore primario.

Speravamo di individuare mutazioni cruciali nella formazione delle metastasi, potenziali bersagli di successivi interventi farmacologici. Ma poiché la genetica delle linee metastatiche aveva poco di speciale, abbiamo rivolto la nostra attenzione non più alle ramificazioni ma all'evoluzione del tumore originario. Ci siamo chiesti se il tronco dell'albero filogenetico abbia un ruolo particolare nella formazione del cancro. Per rispondere abbiamo cercato eventuali mutazioni del DNA nel tronco capaci di alterare la funzione cellulare dei geni notoriamente coinvolti nel cancro.

E le abbiamo trovate. In molti pazienti, per esempio, il gene oncosoppressore *p53*, che inibisce la proliferazione cellulare, era mutato in una fase precoce dello sviluppo di diversi tumori. Lo stesso valeva per il proto-oncogene *KRAS*. (Un proto-oncogene è un gene che mutando diventa un oncogene e induce una cellula a dividersi senza sosta.) Quasi tutti i pazienti con cancro al pancreas, per esempio, avevano una mutazione precoce nel 12° sito di *KRAS*.

Se questi geni chiave sono frequenti nelle radici degli alberi filogenetici del cancro, significa che hanno un ruolo formativo nell'origine dei tumori e delle loro metastasi. La nostra ipotesi è che con l'accumulo di driver oncogeni le probabilità che si verifichino metastasi si riducono a una semplice questione di numeri: maggiore è la quantità di cellule tumorali presenti, maggiori sono le possibilità che si trovino in una posizione, o in uno stato epigenetico, che ne faciliti la diffusione.

È necessario condurre ulteriori ricerche per chiarire in che modo questi geni chiave influiscano sulle probabilità di formazione di tumori e metastasi. E anche in quest'ottica i driver precoci meritano molta attenzione. Bersagliarli con i farmaci potrebbe essere fondamentale nelle terapie oncologiche, sia nelle fasi iniziali di sviluppo dei tumori primari sia negli stadi successivi.

Ricrescita

Studi clinici recenti dimostrano che è possibile anche attivare il sistema immunitario dell'organismo stesso affinché distrugga le cellule tumorali. Sembra però che i tumori sviluppino una resistenza sia verso i farmaci sia verso l'immunoterapia. Questa resistenza deriva da mutazioni specifiche, come il tumore? O è un sintomo del microambiente e di altri fattori, come sembra sia il caso delle metastasi? Ancora non lo sappiamo, ma gli alberi filogenetici hanno fatto un po' di chiarezza sulla questione.

I nostri studi con i cronogrammi hanno rilevato che anche altri geni meno noti, sospettati di stimolare la cancerogenesi, erano mutati. La mutazione però tendeva a verificarsi in una fase successiva dello sviluppo della malattia. In altre parole, le alterazioni non avvenivano nel tronco ma nei rami dell'albero filogenetico, quindi i geni mutati erano presenti solo in alcuni tumori e non in altri. Di conseguenza, le terapie mirate contro queste mutazioni, che alcuni oncologi potrebbero prediligere, sopprimerebbero forse il ramo mutato, ma il resto dell'albero evolutivo del cancro potrebbe proliferare e a mettere a rischio la vita del paziente. Questo tipo di farmaci mirati dovrebbe essere integrato con terapie concepite per sopprimere anche altre tipologie di cellule tumorali.

Al contrario, se un farmaco aggredisce una mutazione precoce presente in tutti i tessuti cancerosi, può svilupparsi una forma di resistenza, grazie allo sviluppo di cellule con nuove mutazioni specifiche. Katerina Politi, patologa della Yale School of Medicine, ha identificato alterazioni del gene *EGFR* – la cui mutazione è un altro importante driver del cancro (soprattutto dei polmoni) – che hanno un ruolo significativo nello sviluppo della resistenza alle terapie. Per capire perché e come questo accade, il nostro gruppo di ricerca ha adottato alcuni metodi della biologia evolutiva. Stiamo sviluppando gli alberi filogenetici del cancro di alcuni pazienti e cercando mutazioni tra i rami da cui derivano tessuti resistenti alle terapie, come nei tumori ricorrenti. I nostri studi preliminari inducono a pensare che la resistenza sia stimolata da cambiamenti genetici che potrebbero derivare dal tipo di terapia a cui è sottoposto il paziente.

Ogni anno aumentano sia il numero di farmaci sviluppati per trattare mutazioni specifiche sia le possibilità di prescrivere combinazioni complesse di chemioterapia, radioterapia e immunoterapia. Gli oncologi non considerano più ciascun tipo di cancro come una malattia omogenea: ogni caso è un'entità a sé stante. In futuro, lo studio della genomica dei singoli pazienti avrà un enorme impatto sulle terapie. Per sfruttare al meglio questi nuovi strumenti, gli oncologi dovranno diventare biologi evolutivi a tutti gli effetti: studiando le variazioni genetiche presenti nei tessuti cancerosi dei singoli pazienti dovranno elaborare una strategia per distruggere l'albero del cancro, dalle radici ai rami. ■

PER APPROFONDIRE

Inferring the Origin of Metastases from Cancer Phylogenies. Hong W. S. e altri, in «Cancer Research», Vol. 75, n. 19, pp. 4021-4025, ottobre 2015.

Early and Multiple Origins of Metastatic Lineages within Primary Tumors. Zhao Z.-M., e altri in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 113, n. 8, pp. 2140-2145, 23 febbraio 2016.

Come si diffonde il cancro. Ruoslahti E., in «Le Scienze» n. 339, novembre 1996.

LAGUNA DESIGN/SPL/AGF

BIOLOGIA MARINA

La bestia perfetta

I mixotrofi, minuscole creature marine che cacciano come gli animali ma crescono come le piante, possono estendere la loro influenza dalle popolazioni ittiche al tasso di riscaldamento globale

di Aditee Mitra

Illustrazione di Mark Ross Studios

Colpito a tradimento: un mixotrofo, *Dinophysis* (*a destra*), risucchia gli organelli fotosintetici di un altro, *Mesodinium*.

Aditee Mitra è una ricercatrice specializzata in mixotrofi e zooplancton. È un'esperta di modelli della dinamica dei sistemi applicata al plancton ed è *lecturer* di scienze della vita presso l'Università di Swansea, in Galles.

È estate e la luce del sole scintilla sulle acque tiepide al largo della costa spagnola. Il mare ha un aspetto calmo e placido. Poco sotto la superficie, nuota pigramente in circolo uno sciame di organismi microscopici, alcuni color rosa-arancione e altri verde scuro, invisibili a occhio nudo: si tratta del plancton, che cattura i raggi del sole e, grazie alla fotosintesi, ne sfrutta l'energia per fabbricare sostanze nutritive.

All'improvviso una creatura dotata di tentacoli chiamata *Mesodinium* – con i suoi 22 micrometri un vero e proprio gigante rispetto ad alcuni degli organismi del plancton, grandi appena 3 micrometri – appare serpeggiando nell'acqua. È stato attirato dagli zuccheri e dagli amminoacidi che fuoriescono dagli individui più piccoli. I suoi tentacoli balzano fuori all'improvviso e avvolgono la preda, sfortunati organismi verdi detti nanoflagellati, che vengono completamente ingeriti e digeriti.

I gusti del predatore sono più difficili, ma altrettanto brutali, nei confronti di un'altra preda, le rosacee criptoficee. Le digerisce e le fa a pezzi quasi completamente, ma lascia interi gli organelli responsabili della fotosintesi. Entro qualche minuto il corpo pallido di *Mesodinium* diventa rosso scuro via via che si riempie delle parti di cui si è appropriato (cloroplasti e nucleosomi) e che sono rimaste perfettamente funzionanti. *Mesodinium* non è in grado di assorbire e usare l'anidride carbonica come un vero organismo fotosintetico; per svolgere quel compito sfrutta i cloroplasti delle sue vittime. Questa duplice strategia di cacciare le prede come un animale e compiere la fotosintesi come una pianta è nota come mixotrofia.

Mesodinium non riesce però a tenere i tentacoli sul bottino molto a lungo. Non lontano, infatti, c'è in agguato un altro mixotrofo, un po' più grosso e con una diversa strategia di caccia: si tratta del dinoflagellato *Dinophysis*, che comincia a muoversi in cerchio intorno a *Mesodinium* finché scaglia filamenti simili ad arpioni con cui lo immobilizza. A questo punto l'aguzzino somministra il colpo di grazia. Incide la sua vittima con un'appendice detta peduncolo, simile a una cannuccia anche nel modo di comportarsi: risucchia le parti interne di *Mesodinium*, compresi i cloroplasti rubati. Queste fabbriche fotosintetiche, ormai di terza mano, sono quindi assimilate dal nuovo ospite, e cominciano a rimescolarsi all'interno di *Dinophysis*, dandogli energia per sopravvivere. La corrente si porta via i resti del ladro originario, *Mesodinium*, appena massacrato.

Questi killer unicellulari sono soltanto due esempi degli innumerevoli costituenti planctonici mixotrofi che si trovano nei nostri mari. Per molto tempo la maggior parte degli scienziati ha trattato i mixotrofi come curiosità di poco conto rispetto ai due gruppi principali di componenti unicellulari del plancton che si pensava dominassero la base della rete alimentare dell'oceano. Uno di questi gruppi, il fitoplancton (vegetale), per sopravvivere fa uso dell'energia luminosa e di nutrienti inorganici come i nitrati. L'altro gruppo, lo zooplancton (animale), si ciba del fitoplancton. In questo modo, grazie alla rete trofica, i nutrienti sono passati agli animali più grandi. Rispetto a questi due puristi, i mixotrofi erano considerati dei tipi eccentrici e inefficienti, che cercano di fare tutto ma non sono buoni a nulla. (Per inciso, ci sono anche alcuni rari esempi di mixotrofi terrestri, come la pianta carnivora dionea, detta anche Venere acchiappamosche.)

Questa visione tradizionale della rete alimentare marina è sbagliata. Esperimenti, osservazioni e modelli di popolazioni di plancton hanno recentemente consentito a me e ai miei colleghi di trovare le prove del fatto che gli organismi planctonici unicellulari, nella maggior parte dei casi, non sono semplici piante, né semplici mangiatori di piante. Si tratta infatti soprattutto di mixotrofi. Di conseguenza la base della rete trofica (e tutto ciò che sta al di sopra) è controllata in modo diverso da come si pensava. Se il plancton è effettivamente per lo più mixotrofo, il numero di organismi non è strettamente limitato dalla fotosintesi ma può aumentare grazie all'alimentazione. Per contro l'energia solare, quando c'è, può dare un'ulteriore spinta alla crescita di organismi che si alimentano.

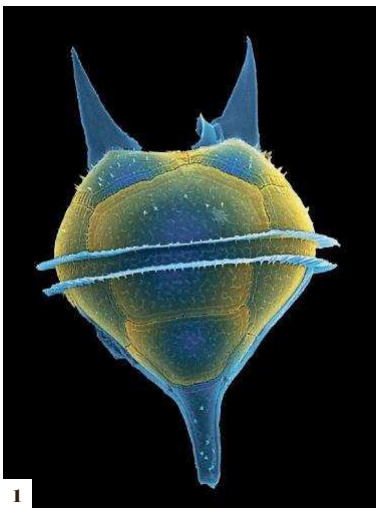
Queste capacità innescano reazioni a catena in ambiti molto diversi, dall'atmosfera terrestre alle popolazioni ittiche. Una maggiore attività dei mixotrofi, per esempio, influisce sulla velocità con cui gli oceani rimuovono dall'acqua di mare e dall'aria l'anidride carbonica (una causa del riscaldamento globale) e la immagazzinano in sedimenti sui fondali oceanici. I gruppi di mixotrofi potrebbero essere meno suscettibili all'aumento e alla diminuzione della luce solare con il variare delle stagioni. Le popolazioni di

IN BREVE

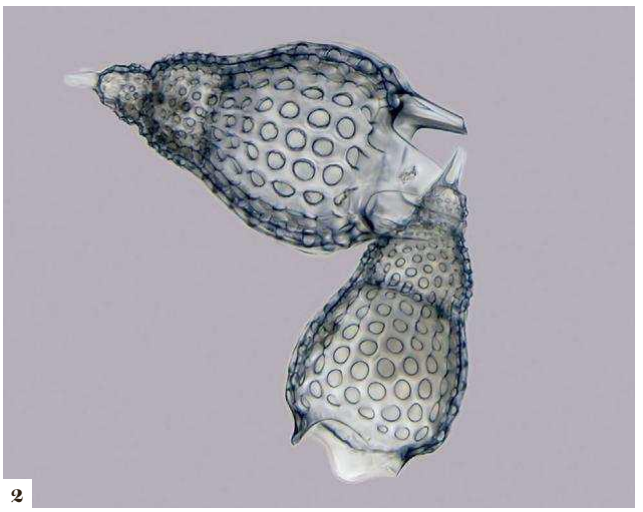
Si riteneva che la rete alimentare oceanica, fondamentale per l'ecosistema terrestre, dipendesse da due gruppi: il fitoplancton (vegetale) e lo zooplancton (animale).

Nuove prove indicano però che molti organismi del plancton sono «mixotrofi»: usano l'energia solare come le piante ma per sopravvivere cacciano e uccidono le prede.

Queste creature ibride condizionano i livelli di carbonio, le popolazioni ittiche e le fioriture algali dannose praticamente in ogni angolo del pianeta.

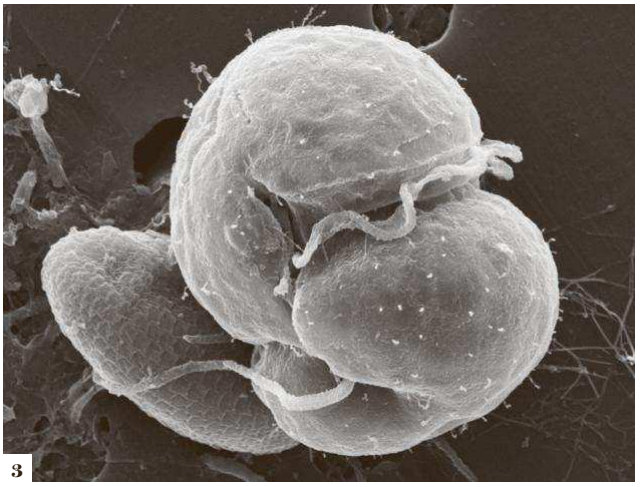


1



2

Minuscoli mostri. Ci sono molti tipi diversi di mixotrofi. Alcuni, come *Ceratium (Tripos) furca* (*1*), compiono da soli la fotosintesi e si cibano di prede. I membri dell'ordine Nassellaria (*2*) invece rubano gli organi fotosintetici alle loro vittime, organismi del plancton. Le specie di *Karlodinium* (*3*) si comportano come *C. (T.) furca*.



3

mixotrofi «buoni» possono sostentare un maggior numero di larve di pesce e incrementare le nostre riserve alimentari. Possono esserci però anche conseguenze negative; alcune specie di mixotrofi provocano dannose fioriture algali che soffocano i vivai di frutti di mare e causano diffuse stragi di pesci.

Se questo nuovo approccio della biologia marina non farà acqua da tutte le parti, e secondo quello che noi e altri scienziati abbiamo scoperto di recente sembra proprio che non accadrà, l'idea di un'ecologia dell'oceano basata su plancton che si comporta «come una pianta» o «come un animale» non è più sostenibile. Tra le onde si nasconde un protagonista diverso, strano e potente.

L'attacco dei trifidi

I mixotrofi sembrano personaggi della fantascienza. Gli arpioni e i peduncoli di *Dinophysis* ricordano, in piccolo, alcune delle caratteristiche delle piante che conquistano la Terra nel famoso romanzo del 1952 *Il giorno dei trifidi* di John Wyndham. I trifidi sfruttavano le proprie radici per estrarre nutrienti dal suolo e per andarsene in giro, ma avevano anche aculei velenosi che usavano come fruste, per accecare o uccidere gli esseri umani e poi cibarsi dei corpi in decomposizione.

La prima volta che ho sentito parlare di mixotrofi del plancton nella vita reale è stato poco più di una decina di anni fa, mentre facevo ricerche per il mio dottorato sul microzooplancton, le forme più piccole di plancton animale. I più piccoli organismi del plancton vegetale, per contro, costituiscono il cosiddetto microfitoplancton. I libri di testo descrivevano i mixotrofi come bizzarre rarità oceaniche. La loro doppia capacità di cacciare le prede e compiere la fotosintesi combinata in un'unica cellula, però, faceva di loro una bestia perfetta, un capolavoro della natura. Dal momento che l'evoluzione tende a favorire l'efficienza, mi sorprese che la mixotrofia non fosse più comune. Cercando ulteriori informazioni trovai un gruppo di pubblicazioni molto stimolanti di Diane Stoecker, un'ecologa esperta di plancton dell'Horn Point Laboratory dell'Università del Maryland. Il suo lavoro sul campo e in laboratorio suggeriva che nel plancton oceanico ci fossero dei mixotrofi. Mi misi in contatto con Diane e le nostre discussioni mi convinsero che lì ci fossero più mixotrofi del previsto. Ma quanti erano, e che cosa stavano facendo?

La mia specializzazione sono i modelli matematici delle reti alimentari, che servono a capire il comportamento dei vari organismi presenti in esse. In sintesi, si tratta di simulazioni al computer. Cercando tra i vari modelli di ecosistemi oceanici, non riuscii a trovarne nessuno che simulasse i dettagli della doppia vita dei mixotrofi. E non riuscii nemmeno a trovare i finanziamenti per costruirne uno: i comitati scientifici che assegnavano i fondi per la ricerca non ritenevano i mixotrofi particolamente importanti. Fu così che, mentre di giorno lavoravo come responsabile per la biodiversità presso la contea di Bridgend, nel Galles, trascorrevo le serate occupandomi del modello per i mixotrofi insieme a mio marito, il biologo marino Kevin Flynn. Nella primavera del 2009, finalmente, avemmo una simulazione funzionante che rappresentava diverse popolazioni di mixotrofi, alcune più dedite alla caccia e altre più alla fotosintesi. Fu pubblicata quello stesso anno nel «Journal of Plankton Research».

Il nostro obiettivo era mostrare che un modello che includeva organismi planctonici dalla doppia natura poteva simulare l'ecologia marina più realisticamente di altri modelli di popolazioni oceaniche che operavano una netta distinzione tra predatori e piante. Variammo le caratteristiche dei mixotrofi nel modello fino a ottenere simulazioni che rispecchiassero le osservazioni dal vivo del flusso di nutrienti nelle reti alimentari, così come le interazioni fra gli altri tipi di costituenti del plancton, come i batteri e minuscoli crostacei chiamati copepodi. Queste dinamiche delle reti alimentari, che pubblicammo nel 2010 nel «Journal of Marine Systems», erano molto diverse da quelle dei modelli con i due tipi distinti di plancton.

Steve Gschmeissner/Science Source (*1*); Frank Fox mikro-foto.de (*2*); Vincent Lovko Mote Marine Laboratory (*3*)

Però avevamo bisogno di andare oltre le simulazioni al computer. Dovevamo raccogliere prove a sostegno della nostra ipotesi che i mixotrofi fossero protagonisti fondamentali dell'andamento altalenante dei nutrienti in tutti gli ambienti dell'oceano e in tutte le creature che lo abitano. Questa volta i soldi c'erano. Colpito dal successo dei nostri modelli, il Leverhulme Trust finanziò l'organizzazione di una serie di convegni in Europa e negli Stati Uniti, nel corso dei quali i ricercatori che studiavano i mixotrofi sul campo e in laboratorio ebbero per la prima volta la possibilità di condividere ciò che sapevano.

Un mondo di ibridi

Durante il primo convegno, nel 2011, il nostro gruppo (ci eravamo autobattezzati «Team Mixotrofi») stilò un elenco di tutte le specie di plancton note per praticare sia la caccia sia la fotosintesi. Nel corso dei decenni gli scienziati avevano identificato specie di mixotrofi in campioni d'acqua di tutti i diversi ecosistemi marini, dalle aree costiere a quelle nel bel mezzo degli oceani, dai poli all'equatore. Avevano condotto esperimenti a bordo delle navi per la ricerca oceanografica e, in alcuni casi, avevano riportato il plancton nei loro istituti per condurre ulteriori esperimenti variando i nutrienti, le prede o l'intensità luminosa per scoprire come si comportavano i mixotrofi in condizioni ambientali diverse.

Fino al momento in cui il nostro gruppo non ha cominciato a raggruppare queste osservazioni, però, la maggior parte dei ricercatori pensava di trovarsi di fronte a fatti inconsueti e poco importanti, anziché di una forma di vita comune in tutti gli oceani del mondo.

Mettendo insieme quei dati siamo giunti alla conclusione che la mixotrofia è piuttosto diffusa negli ambienti marini e che si tratta di un fattore essenziale per l'ecologia. Per Juel Hansen, un ecofisiologo del plancton dell'Università di Copenhagen, insieme ai colleghi, ha dimostrato che senza un numero sufficiente di criptoficee (gli organismi planctonici rosacei citati più sopra), la popolazione di *Mesodinium* non sarebbe in grado di rubare (e ingerire) cloroplasti in numero sufficiente, e si estinguerebbe. Diane Stoecker e il suo gruppo di lavoro, così come quello di Hae Jin Jeong, dell'Università Nazionale di Seoul, ha dimostrato che quando i mixotrofi compiono la fotosintesi in modo attivo mangiano gli altri organismi del plancton con un tasso superiore rispetto a quelli che non la stanno effettuando: una modalità potenzia l'altra. In aggiunta, quando la luce e i nutrienti abbondano, quei particolari mixotrofi hanno un tasso di crescita molto superiore rispetto ai costituenti del plancton legati a un unico processo.

Nel 2012 abbiamo iniziato a guardare oltre la pura e semplice presenza di mixotrofi negli ecosistemi marini, e abbiamo iniziato a dividerli in gruppi sulla base di ciò che mangiano, di come lo mangiano e di come effettuano la fotosintesi. Abbiamo così scoperto che esistono quattro gruppi distinti di mixotrofi, ognuno dei quali occupa un posto diverso in uno spettro di comportamenti misti.

Il primo criterio per discriminare fra i differenti tipi di mixotrofi è stato identificare la fonte delle loro abilità fotosintetiche. Avevano la capacità intrinseca di usare la luce per fabbricarsi il cibo oppure dovevano attaccare una preda per rubarle i fotosistemi? Abbiamo chiamato «mixotrofi costitutivi» quelli con capacità genetiche di produrre e mantenere i propri fotosistemi; questo gruppo comprende molte creature benefiche e fondamentali per l'ecologia, che rivestono ruoli importanti nelle catene alimentari oceaniche. Ci sono però anche numerosi attaccabrighe, di cui vediamo gli effetti nelle devastanti fioriture algali che si verificano quando le popolazioni aumentano in modo incontrollato.

Il mixotrofo *Karlodinium*, per esempio, è noto per aver causato disastrose stragi di pesci in tutto il mondo, dalla Chesapeake Bay negli Stati Uniti alle acque costiere della Malesia. *Prymnesium*, un altro mixotrofo costitutivo che ha provocato morti analoghe al largo delle coste del Texas e nelle acque stagnanti dei Norfolk Broads, nel Regno Unito, rilascia una sostanza chimica che distrugge l'integrità delle membrane cellulari degli organismi del plancton con cui è in competizione, facendoli gonfiare finché esplodono. A questo punto può cibarsi dei loro resti. Le tossine prodotte da un altro mixotrofo, *Alexandrium*, si insinuano nei molluschi che ingeriscono acqua infettata; ecco così che diventa necessario chiudere interi vivai di ostriche, cozze e vongole, perché gli esseri umani che consumano frutti di mare contaminati da *Alexandrium* possono essere colpiti dalla sindrome paralitica da molluschi bivalvi.

Il secondo gruppo non ha capacità fotosintetiche proprie, deve impadronirsene. Si tratta dei «mixotrofi non costitutivi», che comprendono *Mesodinium* e *Dinophysis*. È un gruppo di notevoli dimensioni. L'uso della fotosintesi che fanno i suoi membri era considerato un meccanismo di sopravvivenza aggiuntivo, impiegato soltanto in condizioni di scarsità di prede. Oggi, invece, abbiamo capito che questi organismi sfruttano l'energia solare molto più di frequente: si tratta di un aspetto fondamentale del loro stile di vita.

Le distese di alghe non sono tossiche ma bloccano il passaggio della luce solare, mandando all'aria il ciclo che nutre le minuscole larve di pesce. Meno fioriture algali uguale più pesce

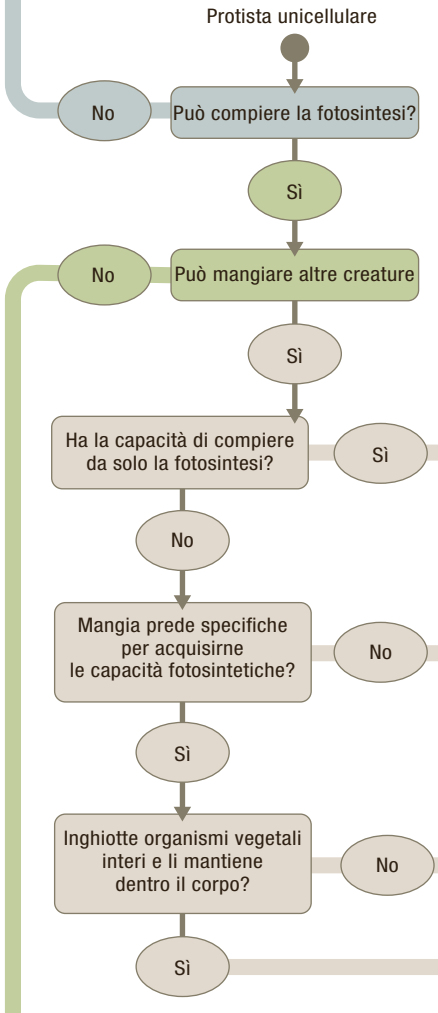
I mixotrofi non costitutivi possono essere suddivisi in generalisti e specialisti. *Laboea* e *Strombidium*, per esempio, entrambi ciliati dotati di plastidi, sono generalisti che rubano i cloroplasti a diversi tipi di organismi planctonici. I generalisti non sono in grado di conservare queste parti rubate per più di qualche giorno, e devono così attaccare costantemente nuove prede per sostituirle. Tendono a essere mixotrofi utili, contribuendo con fattori nutritivi alle reti alimentari che sostengono le zone di pesca e, di conseguenza, rivestono un ruolo di primo piano nella sicurezza alimentare globale.

Gli specialisti, d'altro canto, dipendono esclusivamente da un certo tipo di preda e sembra che l'evoluzione li abbia resi più abili a integrare nella propria fisiologia i fotosistemi rubati: sono in grado di mantenerli intatti per settimane, o addirittura mesi. Alcuni, come *Dinophysis*, possono essere nocivi per l'uomo. I frutti di mare esposti a *Dinophysis* possono provocare intossicazioni alimentari potenzialmente fatali; fioriture algali estese come quelle che si sono verificate nel Golfo del Messico hanno causato la chiusura dei vivai di ostriche.

Alcuni mixotrofi specialisti possono essere ulteriormente suddivisi in un altro gruppo, caratterizzato da un comportamento davvero notevole. Questi organismi non si limitano a rubare parti del corpo, come fa *Mesodinium*, ma ingeriscono e schiavizzano intere colonie di prede fotosintetiche. Queste colonie vivono e si riproducono all'interno dell'ospite, cibandosi dei nutrienti e godendo della protezione dai predatori esterni. Queste «serre di plancton» includono microrganismi chiamati foraminiferi e

Un nuovo zoo di plancton

Il microplancton, costituito da organismi marini unicellulari, è una delle forme di vita più importanti del nostro pianeta, e sostiene la rete trofica globale. Un tempo gli scienziati pensavano che questi organismi si dividessero in piante e animali, ma nuove prove indicano che gli individui del microplancton vivono per la maggior parte da mixotrofi: combinano in tanti modi diversi la fotosintesi, caratteristica dei vegetali, con la caccia e l'alimentazione tipiche degli animali. Per classificare gli organismi planctonici unicellulari (detti anche protisti), i biologi pongono una serie di domande.



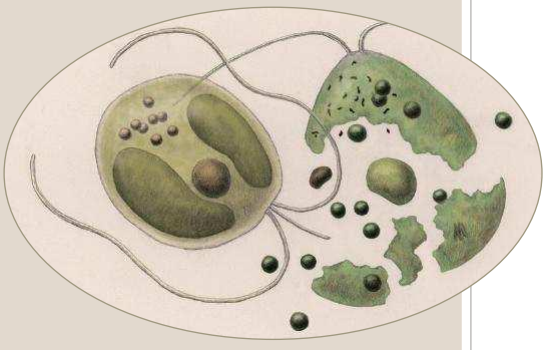
Microzooplancton

Queste creature non hanno la tipica capacità delle piante di sostenersi grazie all'energia solare. Di conseguenza, per sopravvivere devono nutrirsi di altri organismi.

Mixotrofi

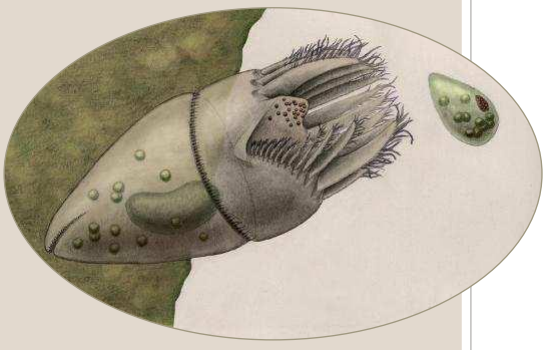
Mixotrofi costitutivi

Queste cellule predatrici hanno una fisiologia che consente loro di usare la luce del sole e le sostanze nutritive per produrre energia. In figura, *Prymnesium parvum*, mixotrofo costitutivo, attacca *Dunaliella tertiolecta*.



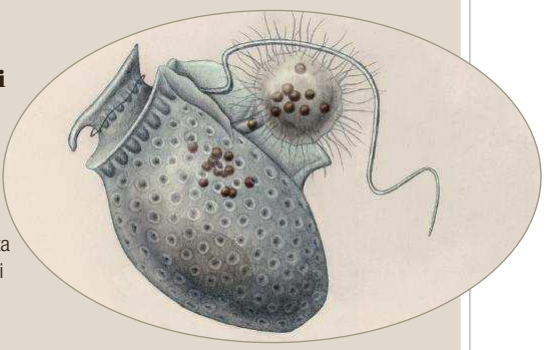
Mixotrofi non costitutivi generalisti

Queste creature usano gli organelli fotosintetici sottratti a varie prede. Qui *Strombidium oculatum* sta rubando una parte del corpo a una vittima del genere *Ulva*.



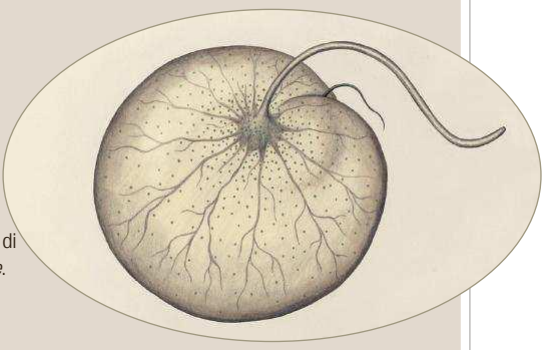
Mixotrofi non costitutivi specialisti dotati di plastidi

Questi predatori rubano parti del corpo a vittime specifiche, uccidendole. Nell'immagine, *Dinophysis acuminata* sta risucchiando gli organelli di *Mesodinium rubrum*.



Mixotrofi non costitutivi specialisti endosimbiotici

Le creature di questo gruppo mantengono nel proprio corpo colonie di prede con capacità fotosintetiche. *Noctiluca scintillans* è qui riempito di *Pedinomonas noctilucae*.



Microfitoplancton

Gli organismi di questo gruppo si comportano come le piante terrestri e sopravvivono grazie alla fotosintesi.

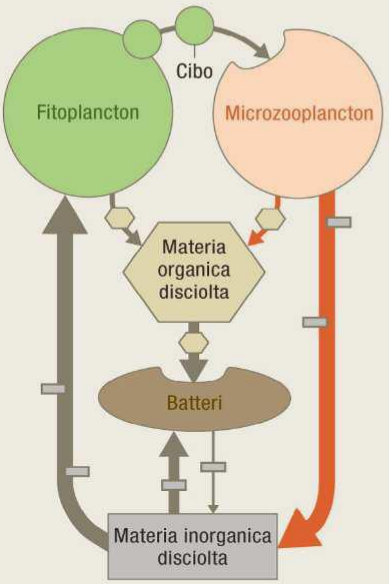
Illustrazione di Rebecca Gelernter; fonte: MITRA, A. e altri, *Defining Planktonic Protist Functional Groups on Mechanisms for Energy and Nutrient Acquisition: Incorporation of Diverse Mixotrophic Strategies*, in «Protist», vol. 167, n. 2, aprile 2016.

Effetto mixotrofi

Quando gli scienziati includono i mixotrofi tra i costituenti del plancton oceanico, anziché assumere che si tratti di organismi puramente vegetali o animali, ne risulta una categorizzazione che provoca cambiamenti enormi nel modo in cui i nutrienti si muovono attraverso la rete alimentare e nelle tempistiche con cui aumentano o diminuiscono le popolazioni di microrganismi importanti. I ricercatori l'hanno capito dopo aver modellizzato la suddivisione tradizionale del plancton in due tipologie e aver confrontato questo modello con uno nuovo, in cui sono inclusi i mixotrofi che depredano altri costituenti del plancton per rubarne le parti fotosintetiche. Gli scienziati hanno anche creato un terzo modello, in cui i mixotrofi hanno capacità fotosintetiche innate. I risultati di entrambi i modelli con i mixotrofi erano più in accordo con le osservazioni dal vivo rispetto al modello tradizionale.

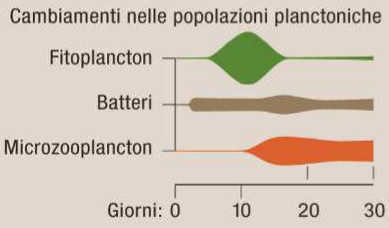
Scenario tradizionale

Il fitoplancton usa l'energia solare e la materia inorganica per fabbricare il cibo, ed è a sua volta mangiato dal microzooplancton. I batteri marini allora scompongono la materia organica rilasciata (gli scarti) e la riutilizzano. È un ciclo rigido che limita la dimensione delle popolazioni.

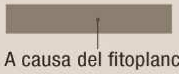


CLASSICA SEQUENZA UNO-DUE

Tradizionalmente, in un ciclo di 30 giorni la popolazione di fitoplancton (*in verde*) cresce per prima. I predatori del microzooplancton (*in arancione*) solo allora hanno abbastanza da mangiare per ingrandire il gruppo, ovviamente a spese del fitoplancton, che ne risulta impoverito.

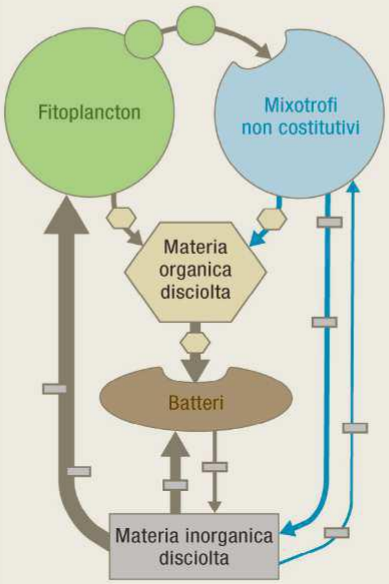


Anidride carbonica rimossa dall'acqua marina
(Totale: 30 grammi di carbonio per metro quadro)



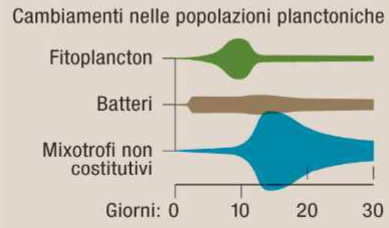
Animali fotosintetici

Quando animali che compiono la fotosintesi (i mixotrofi non costitutivi) si sostituiscono al microzooplancton puramente animale, grazie alle loro capacità ibride trattengono più nutrienti. La freccia azzurra sottile che si allontana dal gruppo indica una minore perdita di nutrienti.



ESPLOSIONE DELLA POPOLAZIONE

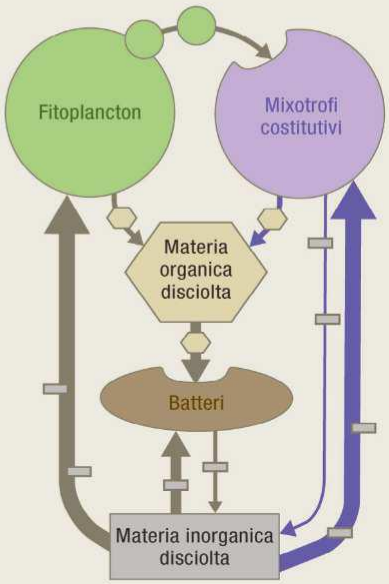
Le popolazioni di mixotrofi non costitutivi (*in azzurro*) possono aumentare più dei predatori tradizionali, perché mangiano e, in più, ottengono energia dalle parti rubate a individui planctonici fotosintetici. La crescita diminuisce gradualmente quando le parti da rubare finiscono.



Anidride carbonica rimossa dall'acqua marina
(Totale: 30 grammi di carbonio per metro quadro)

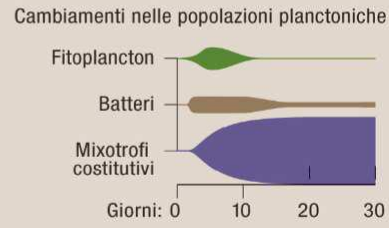
Piante che mangiano

Sostituendo il microzooplancton con piante in grado di cacciare (i mixotrofi costitutivi), lo schema è ancora diverso. Questi individui possono sfruttare molta materia inorganica, come mostra la spessa freccia viola. Così il gruppo sopravvive per un lungo periodo.



UNA CRESCITA AUTOSUFFICIENTE

I mixotrofi costitutivi (*in viola*), dalle innate capacità fotosintetiche, per crescere hanno soltanto bisogno di un piccolo aiuto (cibo in più) da parte del fitoplancton tradizionale.
La loro popolazione aumenta presto e resta numerosa per 30 giorni.



Anidride carbonica rimossa dall'acqua marina
(Totale: 65 grammi di carbonio per metro quadro)

Infografica di Jen Christiansen. Fonte: MITRA, A. e altri, Defining Planktonic Protist Functional Groups on Mechanisms for Energy and Nutrient Acquisition: Incorporation of Diverse Mixotrophic Strategies, in «Protist», vol. 167, n. 2, pp. 106-120, aprile 2016.

radiolari, che si trovano ovunque negli oceani. Per centinaia di milioni di anni i foraminiferi hanno avuto in tutto il mondo un ruolo fondamentale nella cosiddetta pompa biologica del carbonio: assorbono l'elemento in grandi quantità, lo trattengono nei fondali oceanici in cui si depositano e poi, decomponendosi, lo rilasciano a poco a poco. L'analisi di antichi depositi stratificati di foraminiferi ci ha aiutato ad accumulare dati sui cambiamenti climatici del passato e a legarli a eventi di estinzione di massa. Ma non tutte queste serre galleggianti sono innocue. Un tipo di organismo, la verde *Noctiluca*, può causare fioriture algali dannose in acque costiere inquinate.

Regolatori globali

Piante che mangiano e animali che fanno la fotosintesi; minuscoli organismi di 2 micrometri e grandi (relativamente) individui di 1 millimetro: i mixotrofi abbracciano un intervallo piuttosto ampio della vita sottomarina. Perché è così importante? Perché questi piccoli esseri viventi possono avere impatti significativi in molti ambiti diversi.

Per esempio, nel mezzo dell'Oceano Atlantico centrale c'è un'area enorme, grande di migliaia di chilometri quadrati, caratterizzata dalla scarsità di sostanze nutritive. Un tempo gli scienziati pensavano che in questa regione il fitoplancton fosse in competizione con i batteri del mare per nutrienti inorganici disciolti in acqua come il ferro e i fosfati, il che non avrebbe lasciato molto spazio ad altri organismi. Poi il gruppo di Mikhail Zubkov, un biogeochimico microbico all'epoca al National Oceanography Centre del Regno Unito, scoprì in un campione dell'acqua di quell'area raccolto durante una spedizione scientifica una popolazione considerevole di mixotrofi costitutivi (quelli che eseguono la fotosintesi da sé).

Se non fosse per i mixotrofi, la quantità globale di anidride carbonica potrebbe essere ancora più elevata in tutto il mondo

Partendo da queste osservazioni, il «Team Mixotrofi» ha sviluppato due simulazioni di reti alimentari. Una si basava sul modello tradizionale di competizione piante-batteri, mentre l'altra includeva i mixotrofi. Il nostro gruppo ha scoperto che la simulazione con i mixotrofi era quella che si adattava meglio alle quantità di fattori nutritivi e ai cicli osservati da Zubkov. Invece di competere con il fitoplancton, i batteri crescevano usando gli zuccheri e gli altri nutrienti persi dai mixotrofi; questi ultimi, a loro volta, si cibavano dei batteri, dai quali ottenevano più fosfati e più ferro di quanti riuscissero a estrarne dall'acqua marina. E il modello era in linea con le osservazioni soltanto nel caso di mixotrofi costitutivi.

C'era un altro aspetto fondamentale: i livelli di fissazione del carbonio (l'anidride carbonica estratta dall'acqua di mare dagli organismi) aumentavano considerevolmente con i mixotrofi, ma non con il fitoplancton tradizionale. Sembra dunque che, se non fosse per questi esseri ibridi, la quantità di carbonio (che contribuisce al riscaldamento globale) potrebbe essere ancora più elevata in ogni parte del mondo.

I mixotrofi sono particolarmente importanti nelle acque costiere, dove gli effetti sulle zone di pesca possono essere profondi. Nel 2017, usando un modello con mixotrofi di vari tipi per il plancton del Mare del Nord, abbiamo scoperto che quando le specie di mixotrofi più piccole mangiano i batteri marini le loro popolazioni aumentano e, come risultato, possono competere (con successo) con altri tipi di plancton che tendono ad avere fioriture algali. Queste distese appiccicaticce di alghe non sono tossiche, ma impediscono il passaggio della luce solare, mandando all'aria ciclo che nutre le minuscole larve di pesce e le aiuta a crescere. Meno fioriture uguale più pesce.

Per la salute dei pesci è anche importante che i mixotrofi, come hanno mostrato le nostre osservazioni, siano la forma dominante di plancton durante il periodo estivo. Il plancton puramente vegetale cresce in la primavera, ma poi diminuisce: le delicate larve di pesce non possono dipendere da questi organismi. I mixotrofi però in estate sono ancora in giro, e si tratta di cibo buono e nutriente che durante questo periodo può sostenere la crescita dei pesci.

Un duplice futuro

I mixotrofi sono al centro di gran parte delle scienze marine, dai cambiamenti climatici alle proiezioni sulla pescosità dei mari, dalla ricostruzione dell'andamento degli antichi cicli del carbonio alle previsioni delle fioriture algali dannose. Ora la sfida consiste nell'usare le osservazioni in tempo reale insieme ai nostri modelli per stabilire che cosa fanno i vari gruppi di mixotrofi in aree e in stagioni diverse. È importante perché con i cambiamenti climatici in corso abbiamo bisogno di conoscere le condizioni ambientali che provocano fioriture algali, a seconda che si tratti del tossico *Karlodinium* o della verde *Noctiluca*, nociva per l'ambiente, o ancora dei ciliati dotati di plastidi, utili per la sopravvivenza dei pesci. Abbiamo da poco compiuto i primi passi in direzione di questo obiettivo, mappando la presenza dei diversi gruppi di mixotrofi nei mari di tutto il mondo. Ora c'è bisogno di misurare la dimensione delle popolazioni con il variare delle stagioni, perché i cambiamenti della luce e delle temperature influiscono drasticamente sulla crescita e la proliferazione di questi organismi.

Ci sono ancora scienziati secondo i quali queste conclusioni si basano sulle nostre simulazioni tanto quanto si appoggiano alle osservazioni dal vivo. Si tratta di una critica valida, motivo per cui abbiamo bisogno di più ricercatori che esaminino l'attività dei mixotrofi fuori dai laboratori, in mare aperto.

L'anno scorso ho presentato alla Commissione Europea una domanda di finanziamento per formare scienziati in questo senso. Contrariamente alla mia domanda di dieci anni fa, il finanziamento mi è stato accordato con punteggi altissimi da parte dei revisori scientifici della proposta. Il nostro «Team mixotrofi» si sta espandendo, così saremo in grado di formare la prossima generazione di scienziati marini. Speriamo, insieme, di riuscire a comprendere i molti modi in cui le bestie perfette degli oceani possono controllare il nostro mondo imperfetto. ■

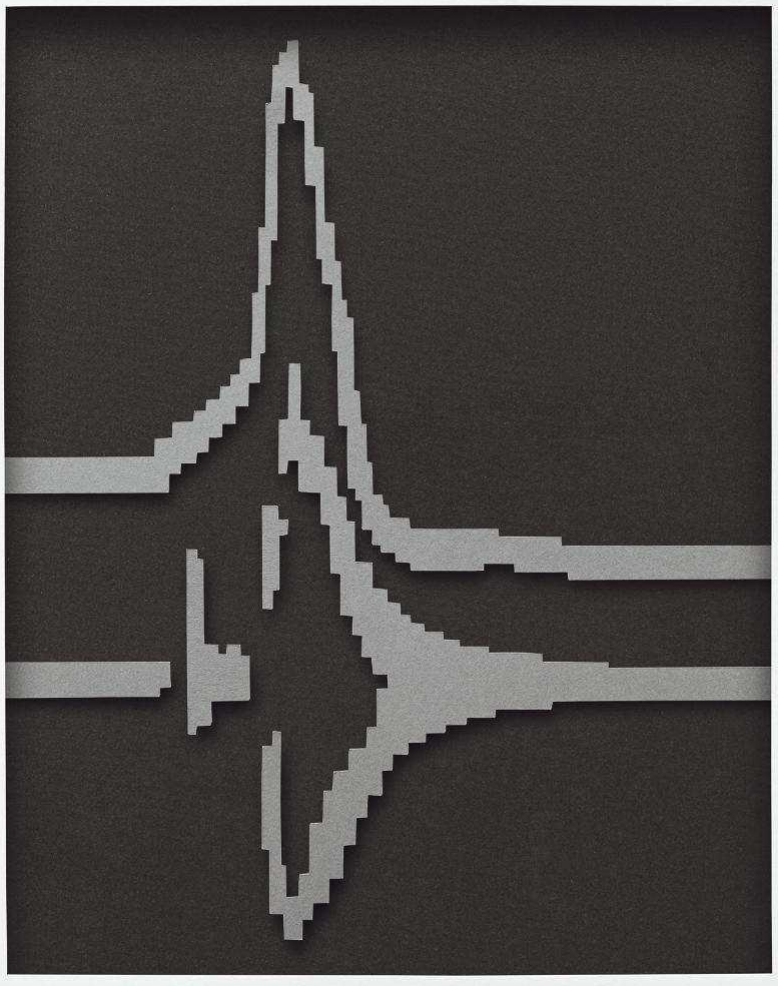
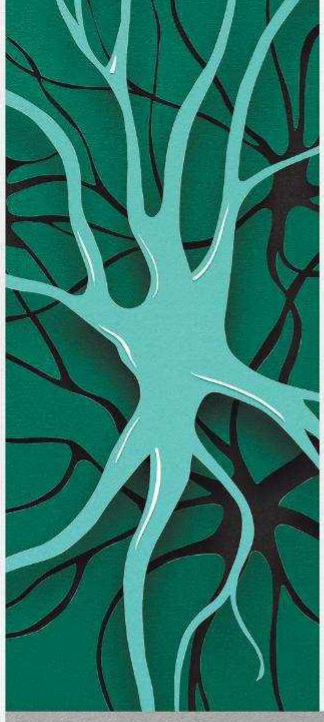
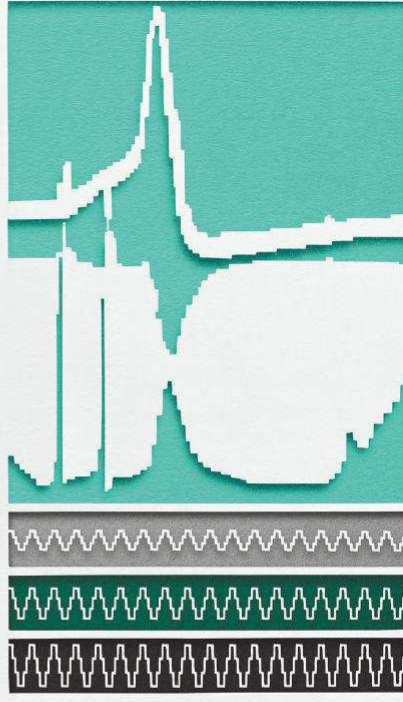
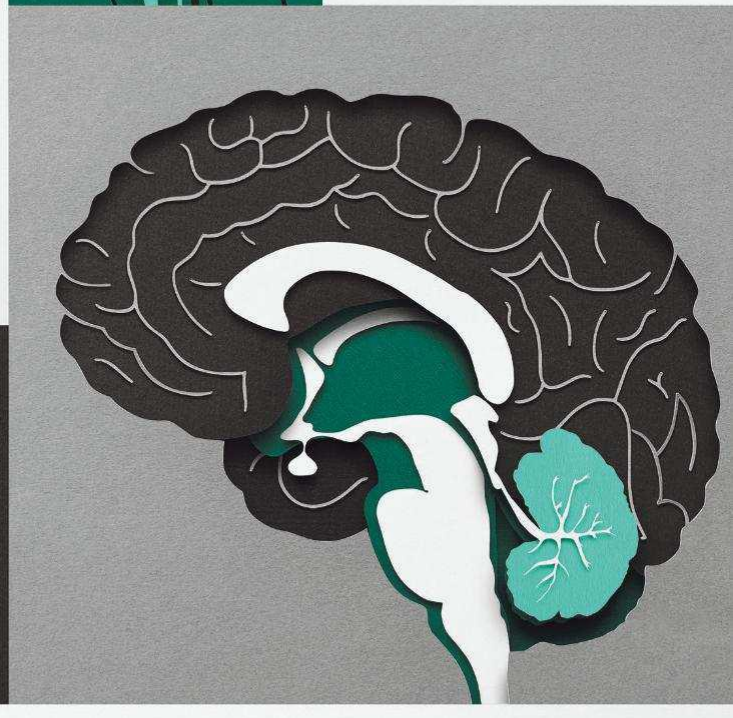
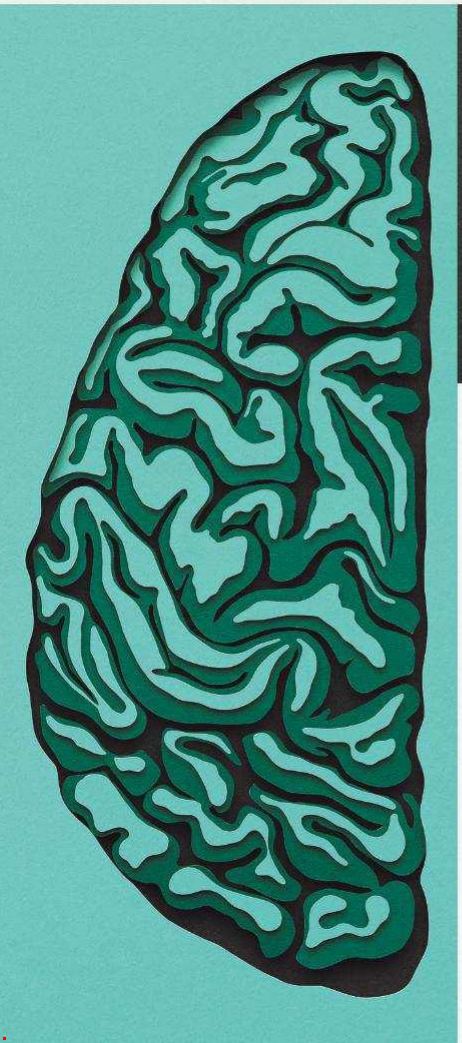
PER APPROFONDIRE

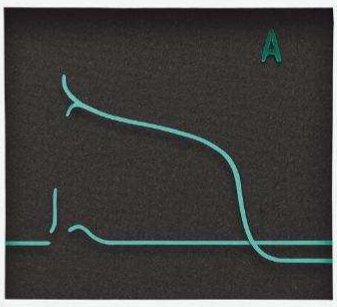
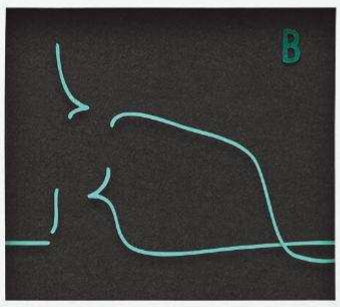
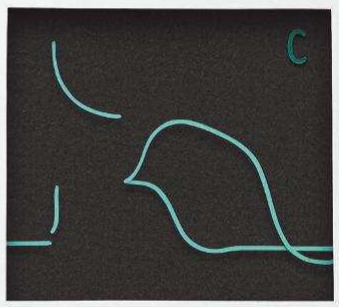
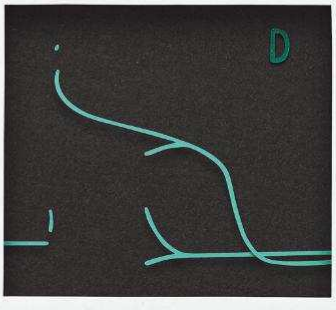
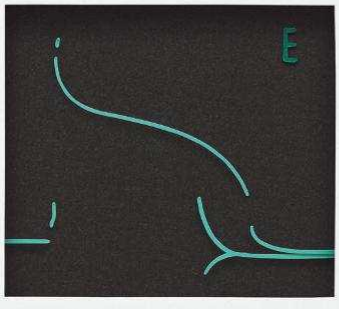
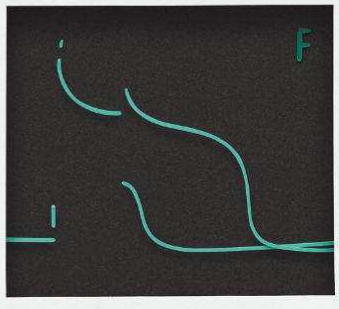
Building the «Perfect Beast»: Modelling Mixotrophic Plankton. Flynn K.J. e Mitra A., in «Journal of Plankton Research», Vol. 31, n. 9, pp. 965-992, 1° settembre 2009.

Defining Planktonic Protist Functional Groups on Mechanisms for Energy and Nutrient Acquisition: Incorporation of Diverse Mixotrophic Strategies. Mitra A. e altri, in «Protist», Vol. 167, n. 2, pp. 106-120, aprile 2016.

Mixotrophy in the Marine Plankton. Stoeker D.K. e altri, in «Annual Review of Marine Science», Vol. 9, pp. 311-335, gennaio 2017.

The Basis of Aquatic Life. Hausman L.A., in «Scientific American», dicembre 1924.


A

B

C

D

E

F

Ripensare il cervello

Alcuni fisici, che hanno riconsiderato esperimenti di cinquant'anni fa, sostengono che i neuroni comunicano con impulsi meccanici anziché elettrici

di Douglas Fox

Illustrazione di Owen Gildersleeve

Douglas Fox scrive di neuroscienze e di climi estremi e vive in California.

Una giovane donna dai capelli castani ondulati e le unghie color granata giaceva su una barella in una stanza d'ospedale a Copenhagen. Una serie di elettrodi era collegata al suo braccio sinistro disteso. A intervalli di qualche secondo, un piccolo scoppio fendeva l'aria: era una scossa elettrica. E ogni volta le dita della donna si contraevano di scatto, mentre lei trasaliva. Quel giorno, di scosse ne avrebbe ricevute centinaia.

La donna, seguita da diversi medici, prestava il suo braccio per una cifra pari a 1000 corone danesi, circa 135 euro. Thomas Heimburg, un fisico esperto di meccanica quantistica e di biofisica, era seduto su uno sgabello, a distanza di sicurezza, e abbozzava sul suo iPad i dettagli di un esperimento brutale che, si augurava, avrebbe prodotto risultati profondi.

I medici avevano iniettato nel braccio della donna un anestetico, lidocaina, una dose forte abbastanza da addormentare il suo braccio per un intervento chirurgico. Inizialmente i nervi dell'arto non rispondevano alle scosse. Ma gli infermieri aumentarono gradualmente la corrente. In quel momento le scosse erano di 40 milliampere, circa dieci volte la forza iniziale, paragonabile alla corrente elettrica di una lampadina da cinque watt.

Pop! Una nuova scossa. La mano della donna si contorse come un serpente agonizzante. Heimburg non ci fece caso perché fissava un monitor alla parete. Una forma d'onda che rappresentava il segnale elettrico nel muscolo e nel nervo del braccio attraversò lo schermo sotto forma di un ampio *spike*, un potenziale d'azione elettrico. Era la prova che scosse sempre più intense avevano iniziato a prevalere sull'anestetico. Ora il nervo scaricava con una forza equivalente a prima che la donna fosse anestetizzata. Heimburg era compiaciuto. «Quello che leggiamo sui libri – disse senza enfasi – contraddice quello che stiamo vedendo».

Heimburg, che lavora al Niels Bohr Institute di Copenhagen, celebre per le ricerche in fisica, spera di contraddire parecchie cose scritte sui libri. Questo esperimento, di cui fui testimone nel dicembre 2011, era stato concepito per indagare un ormai annoso mistero della medicina.

I medici somministrano anestetici generali da 170 anni. Hanno scoperto decine di composti efficaci. Quando sono somministrate a dosi progressivamente più grandi, queste sostanze interrompono le funzioni nervose nel corpo e nel cervello seguendo lo stesso ordine: prima la formazione dei ricordi, poi la sensazione di dolore, poi ancora la coscienza e infine il respiro. Questa identica sequenza avviene in tutti gli animali, dall'essere umano ai moscerini.

Eppure nessuno sa come funziona l'anestesia. Le strutture molecolari dell'ossido di azoto, dell'etere, del sevoflurano e dello xenon sono così differenti da rendere improbabile che esercitino i loro effetti comuni legandosi a proteine equivalenti nelle cellule, come fanno gli altri farmaci.

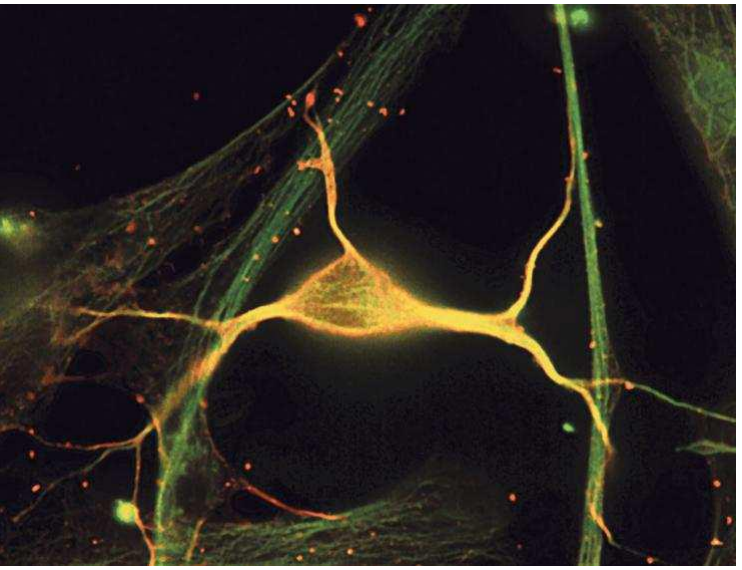
Heimburg ritiene che gli anestetici funzionino in maniera differente, cioè modificando le proprietà meccaniche di un nervo. Se è vero, significa che le cellule nervose, o neuroni, diffuse nel corpo e nel cervello sono dispositivi meccanici, non i circuiti elettrici a cui gli scienziati credono da decenni. Secondo la teoria di Heimburg gli impulsi elettrici sono solo gli effetti collaterali di un'onda d'urto fisica che si diffonde lungo il nervo, simile alla diffusione delle onde sonore. Lo scienziato ritiene che gli anestetici addormentino i nervi rendendoli troppo morbidi per trasmettere le onde d'urto, come una corda di chitarra troppo allentata per vibrare.

Quando assistetti all'esperimento fui tentato di considerare Heimburg un tipo svitato. Ma nei sette anni trascorsi da allora lui e i colleghi hanno presentato una serie di prove: delicate misurazioni di come le onde meccaniche si spostano lungo singole cellule nervose, e quanto e con quale rapidità le membrane si espandono e si contraggono, oltre a studi che dimostrano come gli anestetici alterano queste proprietà. Altri scienziati cominciano a mostrare interesse. E ora Heimburg si prepara a un esperimento cruciale, che potrebbe confermare definitivamente la sua tesi: misurare il calore emesso da una cellula nervosa quando al suo interno passa fulmineo un impulso.

I suoi studi continuano a dimostrare che l'impulso nervoso è

IN BREVE

Il fisico Thomas Heimburg potrebbe stravolgere il mondo della biologia. Sostiene che i nervi inviano gli impulsi non elettricamente ma meccanicamente. Per dimostrarlo, sta riconsiderando esperimenti effettuati 50 anni fa da un neuroscienziato rimasto inascoltato. **Secondo la teoria radicale** di Heimburg, un segnale che viaggia lungo una fibra nervosa a forma di tubo è un'onda di compressione, analoga a un suono, che modifica temporaneamente la membrana lipidica (grassa) che riveste il tubo, da fluida a cristallina. **I biologi sostengono** che Heimburg stia rivelando solo gli effetti collaterali di un impulso elettrico. Eppure qualcuno tra loro ammette che le due azioni potrebbero operare insieme. Questo cambierebbe le spiegazioni del funzionamento del cervello.



Il neurone, o anche cellula nervosa (*in giallo*), nell'ippocampo del cervello – il centro della memoria a lungo termine – è sostenuto da proteine (*in verde e rosso*).

più complesso di quanto buona parte dei biologi immagini. Le componenti meccaniche potrebbero essere state trascurate per la casualità della storia: cinquant'anni fa, strumenti accessibili potevano misurare agevolmente gli esili impulsi elettrici nei neuroni, ma non quelli meccanici. I limiti degli strumenti influivano su quali scoperte facevano gli scienziati e quali teorie entravano nel pensiero scientifico ufficiale. Oggi gli esperimenti di Heimburg stanno riaprendo uno scisma scientifico vecchio di decenni.

La storia del neurone meccanico contiene insegnamenti per la scienza in generale, riguardo a distorsioni, pregiudizi e casualità della storia. E potrebbe anche cambiare la nostra comprensione fondamentale dei nervi, del cervello e dell'intelligenza. Gli scienziati ci hanno messo l'anima per spiegare come il cervello realizza imprese formidabili, per esempio riconoscere i volti o conversare, pur affidandosi a proteine dei neuroni che sono elettricamente «disturbate» e inaffidabili. Heimburg sta dimostrando come le onde meccaniche potrebbero compensare questo rumore. Se la sua teoria si dimostrasse vera, potrebbe riscrivere la biologia. O magari potrebbe avere semplicemente torto.

Nervi caldi

L'impulso neurale che gli scienziati cercano di spiegare da tanto tempo dura un istante appena. Se calpestate una puntina da disegno, il vostro cervello percepirà il dolore in una frazione di secondo. Il segnale viaggia nelle fibre nervose a una velocità che raggiunge i 30 metri al secondo.

Le fibre somigliano a minuscoli tubi cavi, sottili più di un capello. La parete del tubo è formata da una membrana cellulare di sostanza oleosa. Atomi di sodio e di potassio elettricamente carichi, chiamati ioni, stazionano nei pressi della parte interna e di quella esterna della membrana. Intorno alla metà del Novecento, i ricercatori avevano imparato a introdurre gli elettrodi nelle cellule nervose per rilevare la differenza di potenziale attraverso le pareti della membrana. Scoprirono che, quando un impulso nervoso viaggia lungo la membrana e oltrepassa l'elettrodo, il potenziale registra un picco per vari millesimi di secondo. Nel 1952 due scienziati britannici, Alan Hodgkin e Andrew Huxley, riferirono che il picco si registra quando gli ioni sodio fluiscono dall'esterno verso l'interno attraverso la parete della membrana; a quel punto il potenziale si inverte e ritorna al valore normale, quando gli ioni potassio zampillano attraverso la membrana dall'interno verso l'esterno. Il modello di Hodgkin e Huxley è diventato il fondamento della neurofisiologia moderna.

Hodgkin e Huxley ricevettero il premio Nobel nel 1963. Ma un piccolo gruppo di scienziati ha continuato a tirare fuori osservazioni che minavano il loro modello, osservazioni che Heimburg ha ricreato, nonostante alcuni di quegli scienziati fossero stati emarginati perché considerati fuori strada.

Di loro faceva parte il *senior neurobiologist* Ichiji Tasaki, che per molti anni lavorò negli statunitensi National Institutes of Health (NIH). Nel 1979 Tasaki effettuò un esperimento «eretico». Usando un microscopio, dispose un granello di platino lucente in cima a un sottile filo bianco – un fascio di fibre nervose di un granchio, esposto dissezionando la zampa dell'animale – e puntò un fascio laser sul platino. Misurando la riflessione del laser, avrebbe potuto rilevare movimenti che avrebbero mostrato se il fascio nervoso si allargava o si restringeva rapidamente mentre era percorso da un impulso elettrico. Tasaki e il suo borsista Kunihiko Iwasa eseguirono centinaia di misurazioni. In una settimana il responso fu chiaro: ogni volta che un impulso era sparato lungo le fibre nervose, queste ultime si allargavano brevemente, per poi restringersi, e tutto questo in pochi millesimi di secondo.

L'onda era minuscola: la superficie si sollevava di 7 miliardesimi di metro appena. Ma coincideva perfettamente con il passaggio dell'impulso elettrico, confermando il sospetto che Tasaki coltivava da anni, e cioè che Hodgkin e Huxley avessero torto.

Già negli anni quaranta i ricercatori avevano notato che, quando un impulso elettrico attraversava una fibra nervosa, la cellula da traslucida diventava più opaca. Nel 1968 Tasaki e un altro gruppo di ricerca avevano scoperto le prove che, quando l'impulso arrivava, alcune molecole nella membrana si riorganizzavano fisicamente, per ritornare poi alla configurazione originaria, una volta passato l'impulso.

C'era poi la questione del calore. I ricercatori si aspettavano che un impulso elettrico producesse calore, un fatto comune quando scorre elettricità. Diversi gruppi di ricerca scoprirono, però, qualcosa di strano. La temperatura di una fibra nervosa aumentava di diversi milionesimi di grado quando un impulso sfrecciava al suo interno; eppure, dopo il suo passaggio, la temperatura ritornava rapidamente al valore iniziale. Il calore non si era dissipato. Il nervo lo aveva infatti riassorbito in buona parte, e per giunta in pochi millesimi di secondo.

Per Tasaki allargamento transitorio, riorganizzazione delle molecole, riscaldamento e raffreddamento suggerivano una conclusione sorprendente: il segnale nervoso non era solo un impulso elettrico; era anche un impulso meccanico. Agli scienziati che studiavano i nervi con gli elettrodi sfuggiva buona parte degli eventi.

Tasaki avrebbe dedicato il resto della vita a indagare questi effetti. Era arrivato a pensare che avessero origine non nella membrana cellulare ma in uno strato di filamenti di proteine e carboidrati appena sotto di essa. Secondo la sua teoria, nel momento in cui arriva l'impulso elettrico, i filamenti assorbono ioni potassio e acqua – motivo per cui si gonfiano e si scaldano – un processo che si inverte dopo il passaggio dell'impulso.

Nel promuovere queste teorie, Tasaki si trovò sempre più in disaccordo con i colleghi. Altri fattori cospirarono contro di

Robert S. McNeil/Science Source

lui. Essendo cresciuto in Giappone, parlava un inglese innaturale. «Dovevi sapere parecchie cose per arrivare con lui al succo del discorso», spiega Peter Basser, che dirige la divisione di neuroscienze agli NIH e ha frequentato Tasaki per vent'anni. «Credo che in molti pensassero che lui non fosse davvero così profondo e intuitivo come in realtà era». E Tasaki, pur collaborando con scienziati ospiti del suo istituto, non creò mai una scuola di allievi che avrebbero promosso le sue teorie.

Emblematica di questo scisma fu la rivalità ideologica fra Tasaki e Kenneth Cole, un altro autorevole neuroscienziato degli NIH, che aderiva alla teoria ufficiale. Sebbene tra gli anni cinquanta e settanta avessero occupato lo stesso edificio con laboratori, i due quasi non si rivolsero la parola per 15 anni, se non nelle presentazioni pubbliche, dove si sabotavano a vicenda, alzandosi tra il pubblico per fare domande pungenti.

Tasaki lasciò il laboratorio nel 1997, quando gli NIH furono riorganizzati, e traslocò in un piccolo spazio nel laboratorio di Basser. Continuò a lavorare sette giorni su sette fino a 90 anni suonati. In un giorno di dicembre 1998, mentre passeggiava intorno a casa, perse l'equilibrio e sbatté la testa per terra. Morì una settimana dopo. Aveva 98 anni.

Da allora gli studi di Tasaki sono usciti di scena. «Non credo che qualcuno mettesse in dubbio che quelle cose erano state osservate, perché in laboratorio lui godeva di stima», ha commentato Adrian Parsegian, biofisico dell'Università del Massachusetts ad Amherst, che lavorò agli NIH dal 1967 al 2009. Piuttosto, i risultati di Tasaki «furono minimizzati come marginali» nello scambio di segnali nervosi, come semplici effetti secondari dell'impulso elettrico. Le domande scientifiche implicite «non furono risolte», ha aggiunto. «Una parte entrò nei libri di testo. L'altra no».

Nel promuovere le sue teorie, Tasaki si trovò sempre più in disaccordo con i colleghi e non creò mai una scuola di allievi

Da oleosa a cristallina

Heimburg scoprì il lavoro di Tasaki a metà degli anni ottanta, mentre svolgeva il dottorato al Max-Planck-Institut für Biophysik a Gottinga, in Germania. Si trovò presto immerso in lunghe sedute in biblioteca, a leggere con attenzione vecchi articoli. Alla fine avrebbe collegato i puntini diversamente da Tasaki. Heimburg pensò che l'onda meccanica, le variazioni ottiche e il calore transitorio dovessero verificarsi nella membrana cellulare, fatta di materiale grasso, non nei filamenti di proteine e di carboidrati sottostanti alla membrana, come riteneva Tasaki.

Alla fine degli anni novanta Heimburg aveva iniziato a effettuare esperimenti, comprimendo membrane artificiali per capire come potevano rispondere a un'onda d'urto meccanica. Questo lavoro rivelò qualcosa di decisivo: le molecole lipidiche oleose della membrana sono normalmente allo stato fluido e orientate a caso, ma si mantengono vicine a una transizione di fase, come la chiamano i chimici. Se si comprime anche di poco la membrana, i lipidi si condensano in un cristallo liquido estremamente allineato.

Questi esperimenti indussero Heimburg ad affermare che un impulso nervoso è un'onda d'urto meccanica che viaggia lungo la membrana nervosa. Mentre avanza, comprime le molecole lipidiche della membrana trasformandole in cristallo liquido, un cambiamento di fase che libera una piccola quantità di calore, proprio come l'acqua quando congela. Poi, pochi millesimi di secondo dopo, quando l'estremità finale dell'onda d'urto è passata, la membrana ritorna allo stato fluido, riassorbendo il calore. Questa breve transizione in cristallo liquido, e poi allo stato fluido, causerebbe anche il breve allargamento della membrana, proprio come avevano osservato Tasaki e Iwasa quando illuminarono quella puntina di platino con un laser.

Gli esperimenti di Heimburg hanno fatto un decisivo passo in avanti. Hanno mostrato come onda d'urto e transizione di fase potrebbero essere collegate al picco di corrente generato dal passaggio dell'impulso. Heimburg ha scoperto di poter trasformare una membrana nello stato a cristalli liquidi semplicemente inviando una corrente elettrica. «Sono circa settant'anni che si applicano correnti alle membrane biologiche, e nessun elettrofisiologo ha verificato che vi fosse una struttura a cristalli liquidi», ha affermato.

I libri di testo ritraggono le membrane cellulari come sottili lamine passive di isolante avvolte intorno a fibre nervose tubulari. Ma i fisici iniziano a capire che le membrane cellulari hanno proprietà sorprendenti. Appartengono a una classe di materiali conosciuta come piezoelettrici, che convertono forze meccaniche in forze elettriche, e viceversa. Gli orologi al quarzo funzionano su questo principio. Significa che un impulso elettrico che viaggia lungo una membrana porterà con sé un'onda meccanica; e, viceversa, che un'onda meccanica che viaggia lungo una membrana si manifesterà in forma di impulso elettrico.

Quando, nel 2005, pubblicarono per la prima volta la loro teoria, Heimburg e il collega Andrew D. Jackson non avevano ancora osservato uno di questi impulsi elettromeccanici in movimento. Un ex studente di Heimburg colmò la lacuna. Nel 2009 Matthias Schneider, un biofisico oggi al Politecnico di Dortmund, in Germania, riferì di essere riuscito a produrre un'onda meccanica applicando una corrente elettrica a una membrana artificiale. La forza dell'impulso era simile a quella trovata nelle cellule nervose. L'onda d'urto viaggiava a circa 50 metri al secondo, una velocità simile a quella con cui i segnali scatenati dalla puntina da disegno corrono dal piede al cervello. Nel 2012 Schneider confermò che gli impulsi meccanici e quelli elettrici facevano parte della stessa onda di membrana.

Ma la sua scoperta più importante arrivò nel 2014. Una caratteristica essenziale di un impulso nervoso è il suo essere tutto o nulla. Se un neurone riceve una scossa debole, non scaricherà un impulso elettrico; se la scossa è forte abbastanza, scaricherà. «C'è una soglia», spiega Schneider. Il quale ha scoperto che le onde elettromeccaniche nelle membrane artificiali erano effettivamente tutto o nulla. A quanto pareva, il fattore determinante era che la membrana fosse premuta con una forza sufficiente da costringerla nella forma a cristallo liquido. Solo a quel punto, spiega Schneider, «si ottiene un impulso».

L'anestesia spiegata

Per quale ragione Heimburg si è dedicato la prima volta a questa teoria dei nervi e dell'anestesia? Nella speranza di scoprirlo sono andato a trovarlo al Niels Bohr Institute la stessa settimana in cui sono stato testimone dell'esperimento in ospedale.

Heimburg aveva la libreria di un fisico, non di un biologo, stipata di volumi di fisici tedeschi ormai defunti. Tra essi, una fila di libri di Hermann von Helmholtz, che a metà dell'Ottocento aveva formulato una premessa chiave della termodinamica, cioè che l'energia può mutare, ma non essere creata né distrutta. Helmholtz aveva misurato, fra l'altro, la velocità degli impulsi nervosi.

Come inviano i segnali i neuroni?

Gli scienziati hanno condiviso per decenni una spiegazione unica di come le cellule nervose (neuroni) trasmettono i segnali nel corpo e nel cervello: ciascun messaggio è veicolato come impulso elettrico che attraversa il lungo assone di una cellula, saltando al neurone successivo. Oggi però un piccolo gruppo di fisici, che ha condotto test insoliti sulle cellule in azione, afferma che il segnale è in realtà un impulso meccanico che si propaga lungo l'assone, simile a un'onda sonora o a un'onda sismica. Alcuni ricercatori sostengono che qualsiasi impulso fisico è un semplice effetto collaterale dell'impulso elettrico. Risolvere questa disputa potrebbe aggiornare le spiegazioni sul funzionamento del cervello.

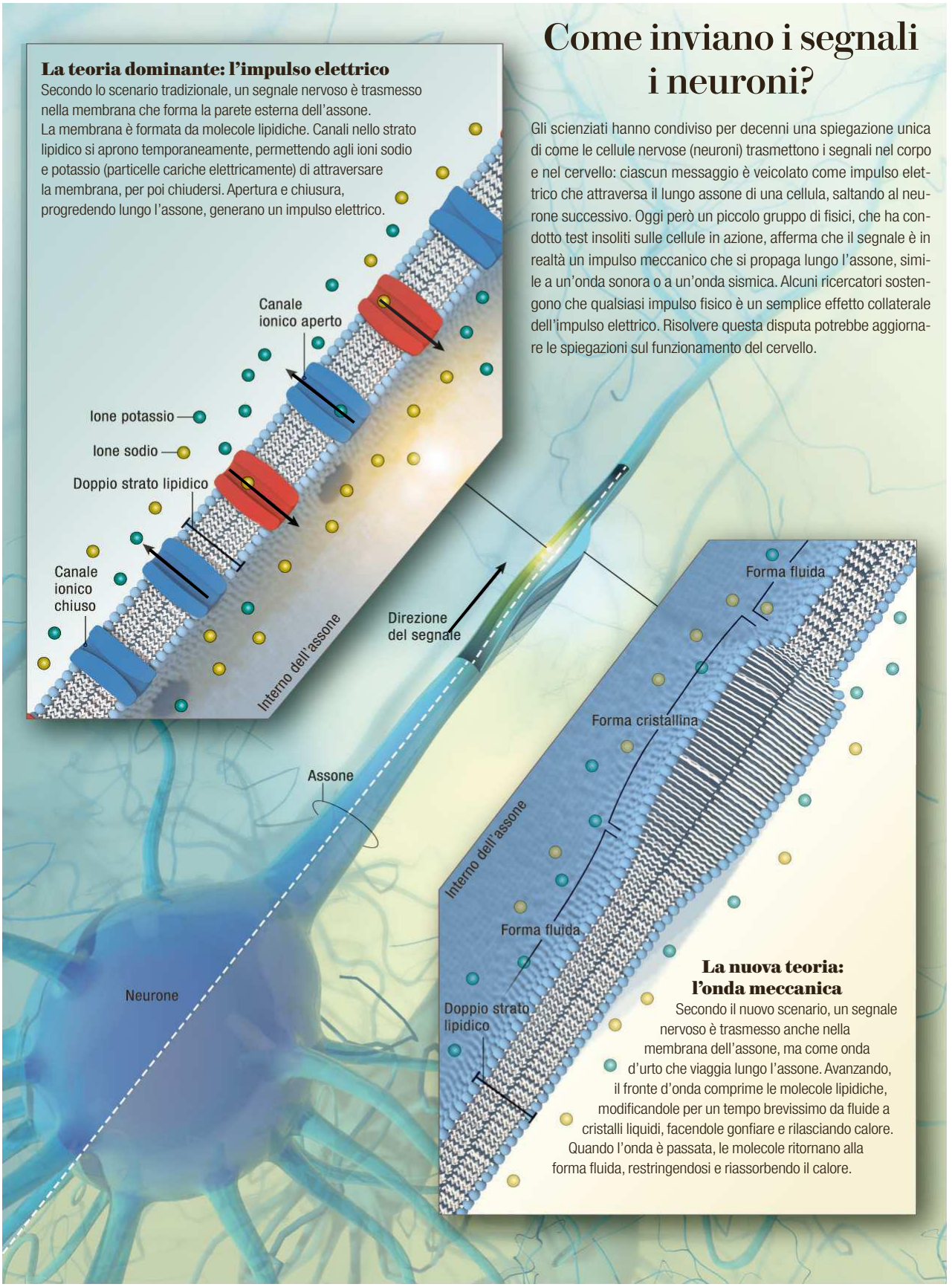


Illustrazione di Falconieri Visuals

«Secondo me è assolutamente obbligatorio leggere questi vecchi testi», ha commentato Heimburg. Essi documentano la scoperta di connessioni fondamentali tra energia, temperatura, pressione, tensione e transizioni di fase. Questi principi sono alla base delle teorie di Heimburg sulla funzione dei nervi, le teorie di un fisico che si è avventurato in un altro campo. «La termodinamica è la scienza più profonda che abbiamo», ha aggiunto. «Se conosci la termodinamica, sei una persona saggia».

Ha presto evidenziato i punti deboli nelle spiegazioni comuni sull'anestesia. I biologi ritengono che gli anestetici addormentino i nervi legandosi, e così bloccandoli, ai canali ionici, che sono come valvole nella membrana nervosa che si aprono e si chiudono, permettendo agli ioni sodio o a quelli potassio di attraversarla. I biologi affermano che il flusso di ioni alimenta gli impulsi elettrici lungo una fibra nervosa, descritti in genere come segnale elettrico. Ma poiché anestetici differenti hanno strutture molecolari che differiscono enormemente, Heimburg non poteva credere che ciascuno di loro si legasse ai canali ionici. Era una spiegazione «ridicola», ha commentato con un accenno di frustrazione, come a sottolineare qualcosa che dovrebbe essere ovvio. Deve operare qualcosa «di più profondo».

Le teorie di Heimburg sono state plasmate in parte da un vecchio volume intitolato *Studien über die Narkose*, pubblicato da Ernest Overton nel 1901. Descrive un particolare esperimento che aveva attirato l'attenzione di Heimburg. Overton prese decine di anestetici differenti e li introdusse ciascuno in una beuta che conteneva acqua con uno strato sovrastante di olio d'oliva galleggiante, poi misurò fino a che punto ciascun farmaco finiva nell'olio invece che nell'acqua. Più un anestetico era potente negli animali, più si trasferiva nell'olio, un risultato sorprendente confermato in seguito per i moderni anestetici. Olio d'oliva e membrane cellulari sono composti dalle stesse molecole oleose, gli acidi grassi. Heimburg ha così ipotizzato che i farmaci potrebbero funzionare immergendosi nelle membrane cellulari, modificando le loro proprietà fisiche.

Esperimenti con membrane sintetiche sostengono la teoria di Heimburg, che tuttavia è criticata dai biologi

Esperimenti con membrane sintetiche sostengono la sua teoria. Quando Heimburg infonde una membrana con un anestetico, impedisce che diventi un cristallo liquido. Ci riesce abbassando la temperatura (e aumentando la pressione) a cui avviene la transizione di fase dal lipide fluido al lipide cristallino: proprio come sale o zucchero abbassano il punto di congelamento dell'acqua.

Secondo il ragionamento di Heimburg, impedire questa transizione in una membrana impedirebbe a un impulso meccanico di viaggiare lungo una fibra nervosa e spiegherebbe perché gli anestetici addormentano i nervi.

In particolare, Heimburg predisse che è possibile eliminare questo effetto. Per generare una pressione maggiore al fine di solidificare una membrana usando una scossa elettrica, è necessario aumentare la corrente: proprio quello facevano i medici al braccio della donna in ospedale, a Copenhagen. Scosse elettriche più intense avevano effettivamente neutralizzato l'anestetico. Se l'anestesia poteva essere neutralizzata aumentando l'intensità elettrica sulla membrana, allora dovrebbe anche essere reversibile aumentando la pressione fisica su una membrana.

I biologi lo avevano dimostrato già nel 1942. Avevano usato due anestetici differenti, etanolo e uretano, per inebriare alcuni girini, al punto che questi smisero di nuotare. Poi gli scienziati misero gli animali in una camera iperbarica e aumentarono la pressione sino a 136 volte quella atmosferica. L'effetto dell'anestetico svanì: i girini ripresero a nuotare. Quando la pressione fu abbassata, gli animali ritornarono immobili. «È sorprendente», ha commentato Heimburg con un sorriso. «Come potrebbe mai venire l'idea di mettere sotto pressione girini ubriachi?».

Il dibattito non è ammesso

Ancora oggi Heimburg è scoraggiato da come i biologi hanno reagito alle sue idee, che lui chiama teoria dei solitoni (un solitone è un'onda che si autolimenta e che conserva la sua forma via via che procede). Ha incontrato resistenza sin dal momento in cui ha pubblicato la teoria nel 2005 sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», nonostante l'alto profilo della rivista.

Uno dei critici, Catherine Morris, neurobiologa all'Ottawa Hospital Research Institute, mi ha detto che quel genere di studi ha tutta l'aria della superiorità trasmessa dai fisici che pensano di entrare in un campo nuovo e di aprire gli occhi alle persone. Riassume il suo pensiero con una battuta: «Mi fa pensare ai fisici quando dicono "possiamo approssimare questa mucca con un punto"».

Per certi versi, la reazione di Morris è comprensibile. Una cosa è affermare che i nervi sono sia meccanici sia elettrici; ben altra è rifiutare l'idea che i canali ionici abbiano un ruolo nella conduzione nervosa, come fanno Heimburg e Schneider nella loro più importante e problematica divergenza dalla biologia ufficiale. Senza considerare che gli scienziati hanno scoperto centinaia di proteine dei canali ionici; o che il flusso di ioni può essere modificato selettivamente con i farmaci; o che le mutazioni che gli scienziati possono produrre nelle proteine modificano la natura dell'impulso nervoso. «Ignorano a cuor leggero capitoli enormi della biologia», commenta Morris, che ha dedicato trent'anni a studiare le proteine dei canali ionici.

Heimburg e Schneider ammettono che queste proteine hanno di sicuro una funzione. Citano però esperimenti, alcuni dello stesso Heimburg, che dimostrano che gli ioni possono attraversare membrane artificiali persino senza proteine canale. Attribuiscono questo flusso a pori transitori che compaiono quando la membrana passa dalla fase fluida a quella a cristalli liquidi, e pensano che ciò accada nei nervi del corpo e del cervello.

Il loro scetticismo riflette una tendenza culturale propria della fisica: la convinzione che tutto sia spiegabile con i principi della termodinamica. I biologi, dicono, hanno trascurato questi principi perché si sono fissati sulle proteine. E questa sorta di integralismo ha forse contribuito a rifiutare la teoria di Tasaki. «Non gli piaceva l'espressione "canali ionici"», ha commentato Iwasa – all'epoca suo borsista – quando ci siamo incontrati verso fine 2017. Questo atteggiamento iconoclasta forse ha guidato Tasaki a scoprire cose che altri non avrebbero potuto scoprire, ha aggiunto Iwasa. «In seguito, però, potrebbe avere giocato a suo danno».

Brian Salzberg è d'accordo. Studia la fisica dei nervi all'Università della Pennsylvania, e ha iniziato la carriera da neuroscienziato nel 1971, incrociando di tanto in tanto il suo cammino con quello di Tasaki. «Era uno sperimentatore di grande rigore e ingegno, non ho dubbi che avesse misurato cambiamenti reali» nello spessore dei nervi, ha detto Salzberg quest'anno. «Ma li ha interpretati in modo sbagliato». Salzberg sostiene che le fibre nervose si gonfino temporaneamente al passaggio di un impulso elettrico, in parte perché le

molecole d'acqua fluiscono nella membrana attraverso i canali ionici che lasciano entrare gli ioni sodio ed escono, di ritorno, attraverso i canali ionici che fanno uscire gli ioni potassio. Se avesse accettato la teoria dei canali ionici, Tasaki sarebbe forse stato aperto ad altre interpretazioni dell'onda meccanica.

Ma un altro potente fattore potrebbe avergli impedito di vedere giusto, un fattore che offre un importante insegnamento per la scienza anche oggi.

Nessun compromesso

È un fatto interessante che l'energia termica di un nervo che scarica un impulso potrebbe essere due volte più grande dell'energia nel segnale elettrico, che si è imposto nelle neuroscienze. Il fatto che queste caratteristiche non elettriche siano cadute in disgrazia potrebbe derivare in parte da uno scherzo della storia.

Tasaki era un talentuoso costruttore di strumenti che si era fatto le ossa scientifiche a Tokyo durante la seconda guerra mondiale. Alle prese con gravi carenze di attrezzatura, aveva assemblato da sé gli strumenti, da componenti elettriche prese qua e là. Anni dopo, negli Stati Uniti, sfruttò questa sua abilità per costruire strumenti ingegnosi e unici, che misuravano il calore, oppure l'espansione temporanea, delle cellule nervose.

Quei dispositivi, e quella abilità, non sarebbero più stati eguagliati da altri scienziati. Un altro paio di maniche era misurare il segnale elettrico nervoso: gli scienziati avevano ideato metodi facilmente trasmissibili, come inserire un minuscolo elettrodo in una membrana cellulare. Con il diffondersi di queste tecniche nei diversi laboratori si diffuse anche la teoria elettrica dei segnali nervosi. «Esiste una deformazione culturale», ha ammesso Parsegian. «Le persone indagano con uno strumento che hanno la sensazione di conoscere e non usano quelli non conoscono. La teoria avrebbe potuto prendere una piega diversa».

Un giorno Heimburg e Schneider potrebbero condividere il Nobel oppure trovarsi con un pugno di mosche in mano

Oggi i divari tecnici stanno scomparendo. Tra il 2011 e il 2018 sono rimasto in contatto con Heimburg, il quale ha ripetuto un vecchio esperimento dopo l'altro, usando tecnologie moderne per fare luce sulle cose sorprendenti che Tasaki, e con lui altri, avevano osservato per la prima volta decenni fa. Nel 2014 Heimburg ha rifatto l'esperimento dei girini ubriachi, usando membrane sintetiche invece di animali: a una pressione di 160 atmosfere, l'impatto degli anestetici si è invertito; ma questa volta Heimburg ha potuto collegare l'effetto direttamente a cambiamenti di fase nella membrana. Nel 2016 ha usato la microscopia per misurare con precisione, in una singola cellula, l'onda meccanica che Tasaki e Iwasa avevano documentato per la prima volta nel 1979.

Heimburg, che oggi ha 58 anni, cerca finanziamenti per quello che potrebbe essere l'esperimento decisivo: misurare il calore quando passa un impulso nervoso, o potenziale d'azione. Tasaki aveva misurato il calore in un fascio di fibre, ma Heimburg vuole usare un microchip che misurerà il picco di calore di un singolo neurone. Questo esperimento potrebbe affrontare una critica fondamentale alla sua teoria: il breve cambiamento in una membrana nervosa dalla fase liquida a quella cristallina dovrebbe rilasciare, e riassorbire, più calore di quanto Tasaki avesse mai rilevato. Heimburg sostiene che i vecchi esperimenti avevano sistematicamente sottostimato il calore: dato che avevano eseguito le misurazioni con molti neuroni, il riassorbimento dopo i primi impulsi aveva annullato il rilascio di calore di impulsi successivi. «Probabilmente il segnale reale è molto più grande», mi ha detto a fine 2017. Se confermate, queste misurazioni potrebbero rafforzare la sua affermazione che la membrana trasmette un'onda meccanica.

Ma la cosa forse più significativa è che altri scienziati si fanno avanti; vengono da altri campi e si chiamano fuori dalle vecchie dispute ormai sterili. Nongjian Tao, un esperto di biosensori dell'Arizona State University, usa i laser per individuare gli impulsi meccanici in singole cellule nervose: proprio come Tasaki e Iwasa; ma Tao fa riflettere la luce sul nervo, non su un minuscolo specchio di platino, così le misurazioni sono più sensibili. Il suo obiettivo è esaminare simultaneamente centinaia di singoli neuroni in reti nervose, con laser che rilevano il viavai delle onde meccaniche. «L'esistenza di effetti meccanici non è in dubbio», spiega Simon Laughlin, neuroscienziato all'Università di Cambridge. «La questione è se i neuroni li usano per fare qualcosa di utile».

Laughlin non lavora sulle onde meccaniche. Ma studia i canali ionici da 45 anni e immagina che le onde potrebbero influenzare le piccole valvole proteiche. Studi recenti dimostrano che le valvole sono sensibili a forze meccaniche nella membrana. Se le onde meccaniche contribuiscono ad aprire e chiudere i canali ionici, ciò potrebbe modificare la nostra comprensione del cervello, perché le scariche dei neuroni mediano ogni pensiero. I canali ionici sono disturbati e tremolanti: anche minuscole vibrazioni termiche possono farli aprire o chiudere in modo casuale. Gli esperti di teoria dell'informazione hanno lavorato decenni per spiegare come il cervello realizza processi cognitivi affidabili usando canali tanto inaffidabili. Ma le onde meccaniche potrebbero significare che aperture e chiusure hanno uno scopo. «È una possibilità concreta», dice Laughlin.

Alcuni indizi fanno pensare che la cosa potrebbe essere vera. Alcuni neuroni nella corteccia cerebrale dei mammiferi sembrano violare la teoria di Hodgkin e Huxley. Quando scaricano con frequenze elevate, i loro canali ionici si aprono, come gruppo, più rapidamente del previsto. Una spiegazione è che i canali rispondono in modo massiccio a un cambiamento improvviso nella membrana: l'arrivo di un'onda meccanica che li apre più o meno all'unisono permette loro di scaricare più rapidamente di quanto altrimenti avrebbero potuto. La velocità potrebbe poi permettere di trasmettere informazione con frequenze aventi una rapidità fenomenale, una possibile base dei processi cognitivi. Secondo questa teoria, un impulso nervoso è elettrico e meccanico al tempo stesso.

Heimburg e Schneider occupano un posto anomalo in questa faccenda. Un giorno potrebbero forse condividere il Nobel, o trovarsi con un pugno di mosche in mano, paralizzati dall'ostinazione che attanagliò Tasaki. Il fatto che alcuni neuroscienziati, come Laughlin, e altri esperti, come Tao, siano interessati alle onde meccaniche sembra un'apertura importante per i fisici. Heimburg, però, è stato irremovibile quando abbiamo parlato a febbraio. «Molti cercano di recuperare in qualche modo il modello di Hodgkin e Huxley combinandolo con la nostra teoria», ha commentato. «Ma non accetto compromessi tra i due modelli». ■

PER APPROFONDIRE

On Soliton Propagation in Biomembranes and Nerves. Heimburg T. e Jackson A. J., in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 102, pp. 9790-9795, 12 luglio 2005.

L'altra metà del cervello. Fields R.D., in «Le Scienze» n. 430, giugno 2004.

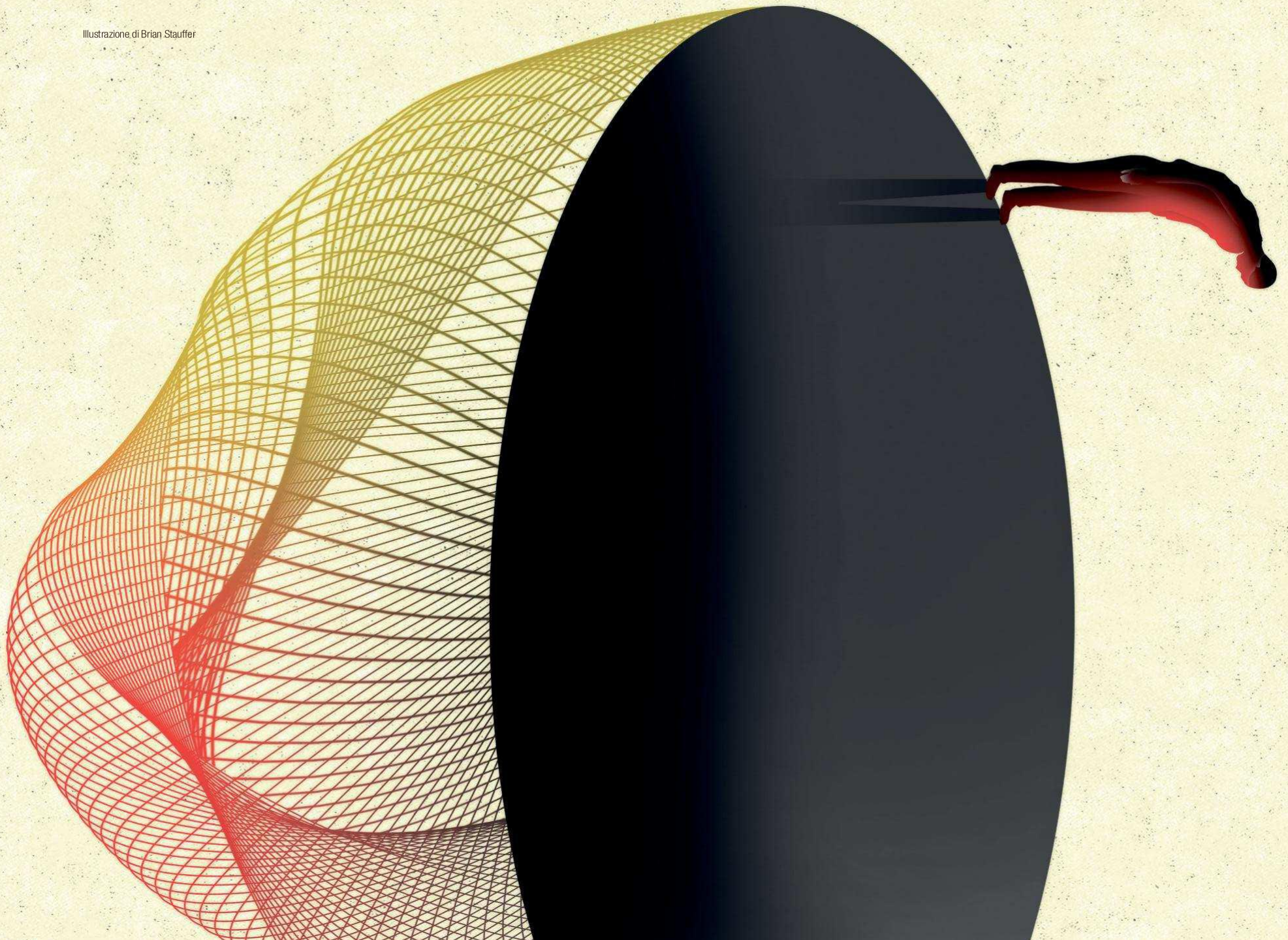


Illustrazione di Brian Stauffer

SALUTE MENTALE

Prevenire il suicidio

Psicologi e ricercatori stanno sperimentando nuovi metodi per dissuadere le persone dal togliersi la vita

di Lydia Denworth

Lydia Denworth vive a Brooklyn e scrive di scienza. È autrice del libro *I Can Hear you Whisper: An Intimate Journey Through the Science of Sound and Language.* Dutton, 2014.

Trenta minuti e una scheda di cartoncino. È tutto ciò che serve allo psicologo Craig Bryan per quello che chiama «pianificare un intervento di emergenza» per un soldato che vorrebbe suicidarsi. «Raccontami com'è andata la giornata in cui hai cercato di ucciderti», chiede. Poi ascolta, e prosegue con domande destinate a costruire un rapporto di fiducia e a rivelare possibili segnali d'allarme.

«Che cosa potresti fare per capire quand'è che stai per arrivare al limite?», chiede Bryan. Il passaggio successivo è la pianificazione, che prevede l'identificazione di strategie di autogestione, come l'esercizio fisico. Inoltre, Bryan chiede all'altro di parlare delle sue ragioni per vivere. «Che c'è di buono nella tua vita anche quando le cose vanno male?». Infine, il soldato scrive a mano sulla scheda la lista delle risorse della sua «rete di sicurezza»: un telefono amico, un terapeuta, il 911, un pronto soccorso.

Questo approccio, così semplice, differisce per molti aspetti dalle terapie più tradizionali. È centrato direttamente su pensieri e comportamenti di tipo suicida anziché sui sintomi di depressione, shock post-traumatico o di qualche altra malattia mentale. Offre alle persone opzioni su che cosa fare invece di dire che cosa non devono fare, a differenza del «contratto di non suicidio» che risale agli anni settanta, in cui si chiede a chi tende al suicidio di non fare del male a se stesso. È rapido, e può anche non richiedere un professionista. Ma la cosa più importante è che funziona. Lo scorso anno Bryan e colleghi hanno riferito che, in un gruppo di 97 soldati con pensieri e comportamenti suicidi, la probabilità che quelli che avevano seguito questa pianificazione dell'intervento di emergenza tentassero il suicidio era più bassa del 76 per cento rispetto a chi che aveva seguito altri trattamenti.

La forza di questo risultato ha sorpreso lo stesso Bryan, che è il direttore esecutivo del National Center for Veteran Studies dell'Università dello Utah. Ma per lui si è trattato di una conferma di qualcosa di cui era già convinto. «Ci troviamo nel bel mezzo di un mutamento di paradigma nel campo della prevenzione del suicidio», dice. «C'è una nuova esplosione di ricerche che rimettono in questione tanti dei vecchi assunti sul tema del suicidio, diffusi non soltanto fra i ricercatori, ma anche fra gli operatori sanitari e il pubblico».

Per decenni il suicidio è rimasto nell'ombra, gravato da uno stigma sociale. Un tempo era considerato un reato, ma uccidere se stessi continua a essere un peccato in alcune religioni. Anche chi sa che pensieri e comportamenti suicidari nascono da malattie mentali o disturbi psicologici ha cercato di evitare la questione o l'ha fraintesa – ospedali e scuole riluttanti agli screening specifici, pazienti inclini al suicidio esclusi dai test farmacologici, scarso sostegno alla ricerca da parte degli enti finanziatori. I pochi clinici e scienziati che lavoravano in questo campo hanno fatto pochi progressi.

Nel frattempo i tassi di suicidi sono aumentati. Tra il 1999 e il 2016, negli Stati Uniti il tasso complessivo è salito del 28 per cento. Per alcuni gruppi, l'impennata è stata addirittura più marcata: fra le donne e gli uomini di mezza età l'aumento è stato rispettivamente del 64 e del 40 per cento. Tra le ragazze di età fra i 10-14 anni, il tasso di suicidi è più che triplicato, anche se resta comunque assai basso. Rispetto al 2001 si è impennato anche il rischio di suicidio per i reduci di guerra: oggi la probabilità che si tolgano la vita supera del 20 per cento quella dei civili. Gli statunitensi morti per suicidio nel 2016 sono stati quasi 45.000; il suicidio è al decimo posto tra le principali cause di morte. E per ogni persona che si toglie la vita ce ne sono quasi 300 che prendono in considerazione l'idea di farlo.

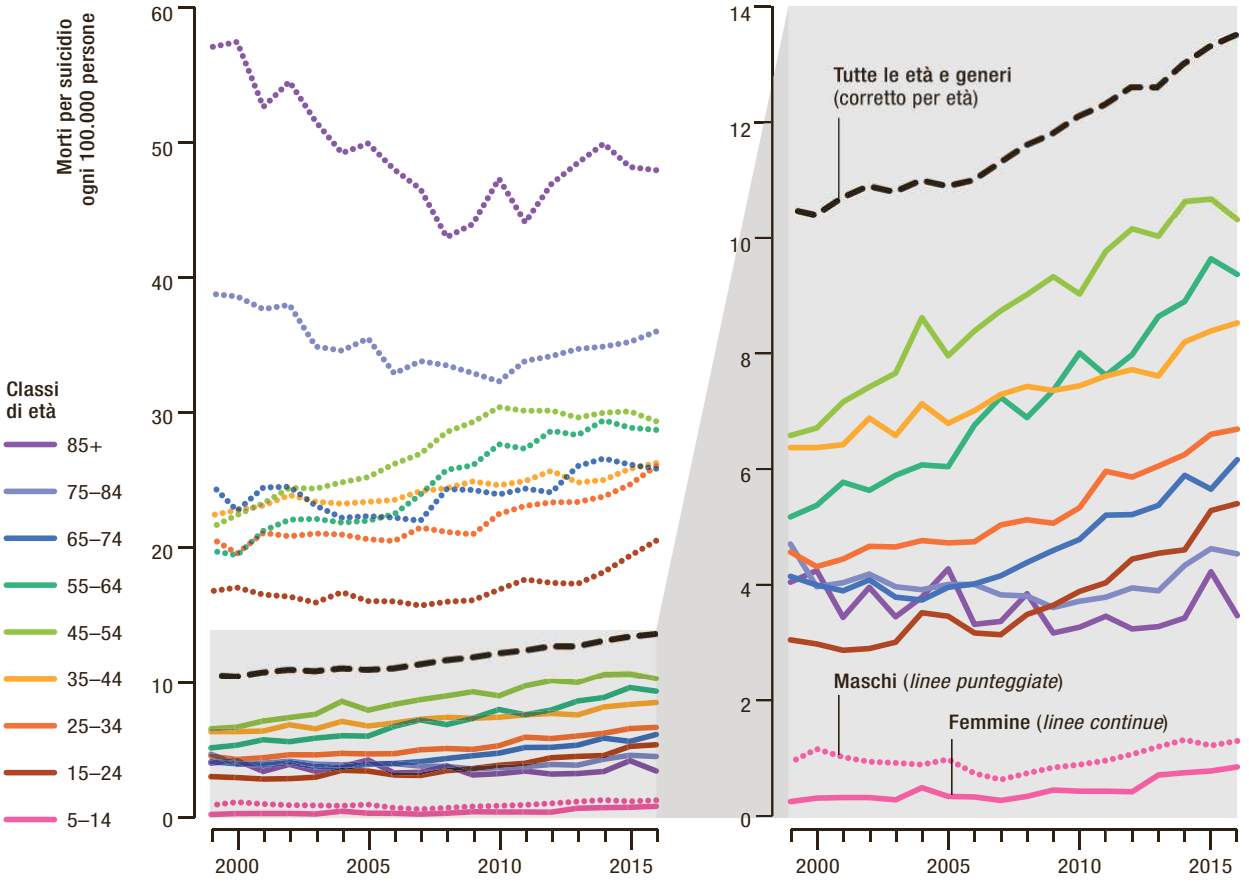
Alla fine, il suicidio è diventato un problema troppo urgente per poterlo ignorare; l'aumento dei tassi tra il personale militare è stato una spinta particolarmente forte all'azione. Il Department of Defense, l'Institute for Veteran Affairs e i National Institutes of Mental Health (NIMH) degli Stati Uniti premono perché si facciano progressi e c'è una nuova generazione di esperti che lavora per far uscire il suicidio dall'ombra e dedicargli tutta l'attenzione necessaria per salvare vite umane. Questo ha comportato affrontare

IN BREVE

Tra il 1999 e il 2016 il tasso di suicidi negli Stati Uniti è salito del 28 per cento e l'aumento è stato più netto fra la gente di mezza età, le ragazze tra i 10 e i 14 anni e i reduci. **Agenzie governative** e psicologi se ne sono occupati sempre di più, impegnandosi a liberare il problema dallo stigma sociale che lo affligge. **Nuove idee e tecnologie** pionieristiche hanno cominciato a dare un contributo alla prevenzione.

Un'impennata inquietante

Negli Stati Uniti, i tassi di suicidio hanno fatto registrare un aumento a partire dal 1999, dopo un declino abbastanza costante tra il 1986 e il 1999. La percentuale complessiva di mortalità per suicidio ogni 100.000 persone nella popolazione generale è salita del 28 per cento tra il 1999 e il 2016, secondo le statistiche compilate dai Centers for Disease Control and Prevention (*linea in nero*), tanto che oggi il suicidio è una delle tre priorità delle autorità sanitarie nazionali statunitensi. Negli ultimi anni il tasso di suicidio è stato in notevole ascesa soprattutto fra adolescenti, giovani adulti e persone di mezza età. (La parte inferiore del grafico è stata espansa nel secondo grafico, a destra, per mostrarne più chiaramente la crescita.)



Grafici di Amanda Montañez; fonte: Centers for Disease Control and Prevention

il suicidio in modo diretto, come una condizione clinica specifica, e riconoscere che lungo tutto il cammino di sofferenze che porta a morire per suicidio – dai primissimi segnali d'allarme fino al tentativo finale – le vecchie strategie diagnostiche e terapeutiche non stavano funzionando.

Al loro posto, i ricercatori hanno applicato nuove idee e tecnologie pionieristiche e cominciato a vedere risultati promettenti. Da approcci a bassa tecnologia come le liste di Bryan all'applicazione di algoritmi di apprendimento automatico per analizzare cartelle cliniche e schemi mentali dei pazienti, una crescente massa di lavori fa pensare che si possa finalmente ridurre la curva dei tassi di suicidio. Rimangono considerevoli difficoltà – tradurre le idee in pratica, applicarle su vasta scala e farle adottare dai clinici. Ma per la prima volta, dice Joshua Gordon, che è entrato in carica come direttore dei NIMH nel 2016 e ha immediatamente posto il suicidio fra le sue tre massime priorità, «adesso abbiamo una base di evidenze per identificare le persone a rischio, e ridurre questo rischio. Ho grandi speranze di poter cambiare le cose».

Identificare il rischio

L'istinto di autoconservazione umano è forte. Allora che cosa spinge le persone a contemplare la possibilità di far del male a se stesse? Le teorie sul suicidio hanno sempre postulato una combinazione di isolamento sociale, dolore insopportabile (primariamente psicologico) e disperazione. Nel 2005 Thomas Joiner, psicologo clinico della Florida State University, ha aggiunto il concetto di «capacità acquisita». Il concetto non ha ancora pieno consenso, ma consiste nel riconoscimento che passare dal pensiero del suicidio all'atto richiede la capacità di superare la naturale avversione verso le ferite e la morte, un traguardo che non tutte le persone angosciate sono in grado di raggiungere. Questa intuizione ha condotto a un nuovo gruppo di teorie che separano ideazione e azione. La teoria dei tre passi di David Klonsky della University of British Columbia e Alexis May dell'Università dello Utah osserva che disposizione individuale (come la personalità), esperienze (come la guerra) e questioni pratiche (disponibilità di armi da fuoco) contribuiscono tutte alla capacità di suicidarsi.

Le migliori teorie, tuttavia, non si sono ancora tradotte in stime migliori su chi ha più probabilità di tentare il suicidio. Nel 2016 un'analisi combinata di decenni di ricerche sui fattori di rischio ha trovato che la capacità predittiva non è migliorata negli scorsi cinquant'anni. «Quando si tratta di prevedere chi è a rischio, quello che fanno i clinici non è meglio del lancio di una moneta», dice Matthew Nock, autore di riferimento dello studio e psicologo clinico della Harvard University, che nel 2011 ha ottenuto un finanziamento della MacArthur Fellowship per le sue ricerche innovative sul suicidio.

La depressione, per esempio, è da sempre ai primi posti nella lista dei segni premonitori, ma l'analisi di Nock ha rivelato quanto in realtà sia inefficace di per sé per effettuare previsioni – e tradizionalmente, la maggior parte dei fattori di rischio sono valutati da soli, uno per uno. Se è vero che molte persone che tentano il suicidio soffrono di depressione, sono assai più numerosi quelli che ne soffrono ma non tentano di uccidersi.

«Il suicidio è trasversale a tutte le diagnosi psichiatriche; quale sia la diagnosi, dunque, non è poi tanto importante», dice Bryan. «Per anni abbiamo guardato la cosa dalla parte sbagliata. Non è il suicidio che è un sintomo di una malattia psichiatrica. È la malattia psichiatrica a essere spesso una manifestazione delle vulnerabilità che conducono al comportamento suicida».

Per identificare più esattamente queste vulnerabilità, vari gruppi di ricerca, fra cui quello di Nock, hanno sguinzagliato macchine ad apprendimento automatico negli archivi elettronici di dati sanitari; è una fra le varie promettenti strade che si stanno seguendo. Gli algoritmi setacciano contemporaneamente migliaia di potenziali fattori di rischio, da età e razza a medicinali assunti, numero di ricoveri e visite mediche, fino a diagnosi di schizofrenia o disturbi dell'umore; ed è possibile addestrarli a formulare previsioni con efficienza assai maggiore di quella degli esseri umani. In uno studio del 2017 Colin Walsh, esperto di analisi dati della Vanderbilt University, e Jessica Ribeiro e Joseph Franklin, della Florida State University, hanno impiegato questa tecnica per analizzare i dati di un gran numero di persone. Nello studio sono stati inclusi 3250 pazienti che avevano tentato il suicidio e altri 1900 che non lo avevano fatto (gruppo di controllo).

Questo approccio ha ottenuto un'accuratezza compresa tra l'80 e il 90 per cento nel «prevedere» retrospettivamente chi avrebbe fatto un tentativo nel giro di due anni ed è risultata corretta al 92 per cento nel prevedere se qualcuno lo avrebbe fatto entro una settimana. Gli algoritmi producono ancora anche un gran numero di falsi allarmi, segnalando rischi di tentativi di suicidio che non esistono, ma i ricercatori sono al lavoro per migliorarne l'accuratezza e testarli a largo raggio: «L'idea sarebbe di avere un software che giri sugli archivi di dati medici archiviati e ci dia dei punteggi di rischio», dice Nock.

Parole rivelatrici

Nock ha cercato inoltre nuovi segni biologici o comportamentali che comunichino l'esistenza di un rischio quando il paziente non può o non vuole ammettere di pensare al suicidio. Un test di associazioni implicite di quattro minuti, sviluppato dal suo laboratorio, si è dimostrato notevolmente valido per rilevare i pensieri suicidari, a prescindere da ciò che dicono le persone.

Nel test, provato in vari trial iniziali, su un lato di uno schermo compaiono le parole «morte» e «io», e sull'altro le parole «vita» e «non io». Poi, al centro, compaiono una alla volta delle parole legate a ciascuna di queste categorie: «morto», «loro», «sopravvivere», «io». I partecipanti premono un certo tasto se la nuova parola va con la coppia di parole di sinistra e un altro se va con quelle di destra. Poi si modificano le coppie, e «vita» viene accoppiata con «io» e «morte» con «non io». Chi risponde più rapidamente quando «morte» e «io» si presentano insieme ha una probabilità circa tre volte maggiore di tentare il suicidio nei successivi sei mesi. Queste osservazioni, pubblicate per la prima volta nel 2010, sono poi state replicate più volte con migliaia di partecipanti.

Di recente Nock ha lanciato uno studio più ampio nel Dipartimento di medicina d'emergenza del Massachusetts General Hospital, che combina questo test di associazioni implicite, somministrato su tablet, con l'esame dei dati sanitari mediante sistemi di apprendimento automatico dimostrato da Walsh e colleghi e con questionari di autovalutazione su fattori di rischio noti e analisi del sangue di marcatori genetici. «Qua e là qualche risultato incoraggiante lo abbiamo avuto, da qualche anno a questa parte», dice Nock, che poi chiede: «E se mettessimo tutto quanto insieme nello stesso computer come si fa per le malattie cardiache? Uno va dal dottore e, in base a statura, peso, età e colesterolo gli dicono qual è la probabilità che abbia un attacco di cuore nel prossimo anno. Possiamo fare la stessa cosa per i tentativi di suicidio?».

Altri esperimenti restano assai più distanti dalle possibilità di uso pratico ma sono comunque interessanti.

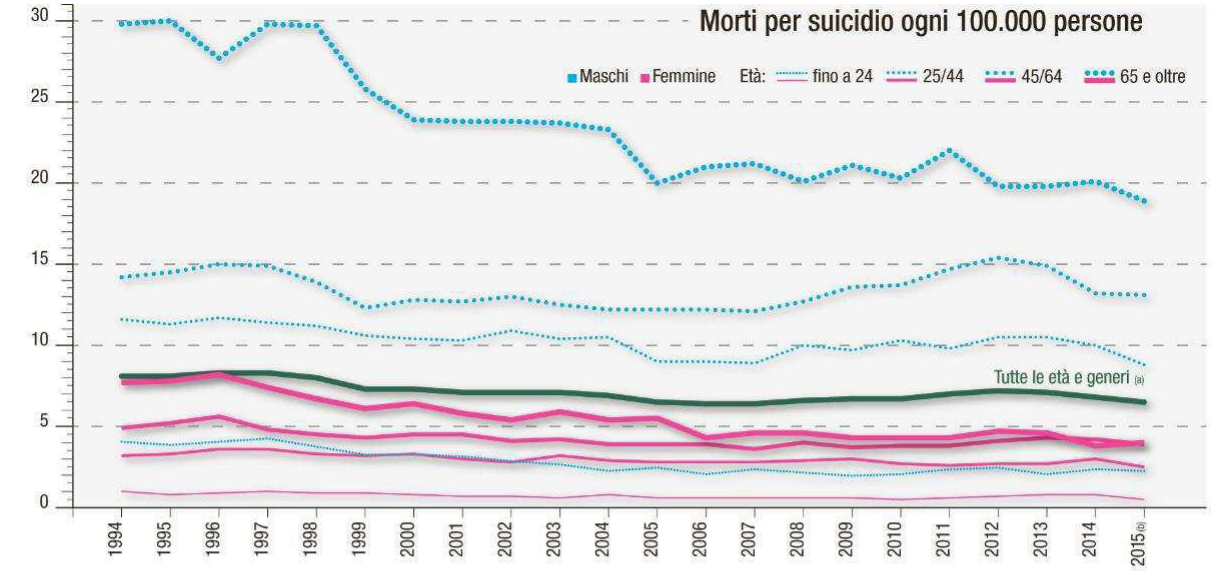
Gli smartphone hanno cominciato a fornire una soluzione per il monitoraggio dei pensieri di suicidio su lunghi periodi

Il test di associazioni implicite di Nock ha attirato l'attenzione di Marcel Just, ricercatore in neuroscienze cognitive della Carnegie Mellon University, che usa la risonanza magnetica funzionale (fMRI) per visualizzare l'attività cerebrale e macchine ad apprendimento automatico per identificare corrispondenze tra schemi di attività cerebrale e andamenti del pensiero. Per esempio, se si presenta la parola «giuria» a una persona che si trova all'interno della macchina per la risonanza, il metodo di Just riesce a vedere che il soggetto sta pensando a un gruppo di persone, all'autorità e alle regole, ma non che quelle persone siedono in un'aula di giustizia e cercano di valutare una serie di prove. Secondo quanto hanno riferito Nock, Just, David Brent dell'Università di Pittsburgh e colleghi nel 2017 su «Nature Human Behaviour», il metodo «neurosemantico» di Just ha rivelato che il cervello di alcune persone propense al suicidio rispondeva diversamente a parole positive e negative collegate alla vita e alla morte, distinguendo esattamente il 91 per cento delle volte tra 17 soggetti che avevano pensato al suicidio e 17 che non lo avevano fatto. Just adesso intende replicare il lavoro e vedere se si può fare lo stesso con l'elettroencefalografia, una tecnica meno costosa che segue l'attività elettrica del cervello, ma in questo è ancora agli inizi.

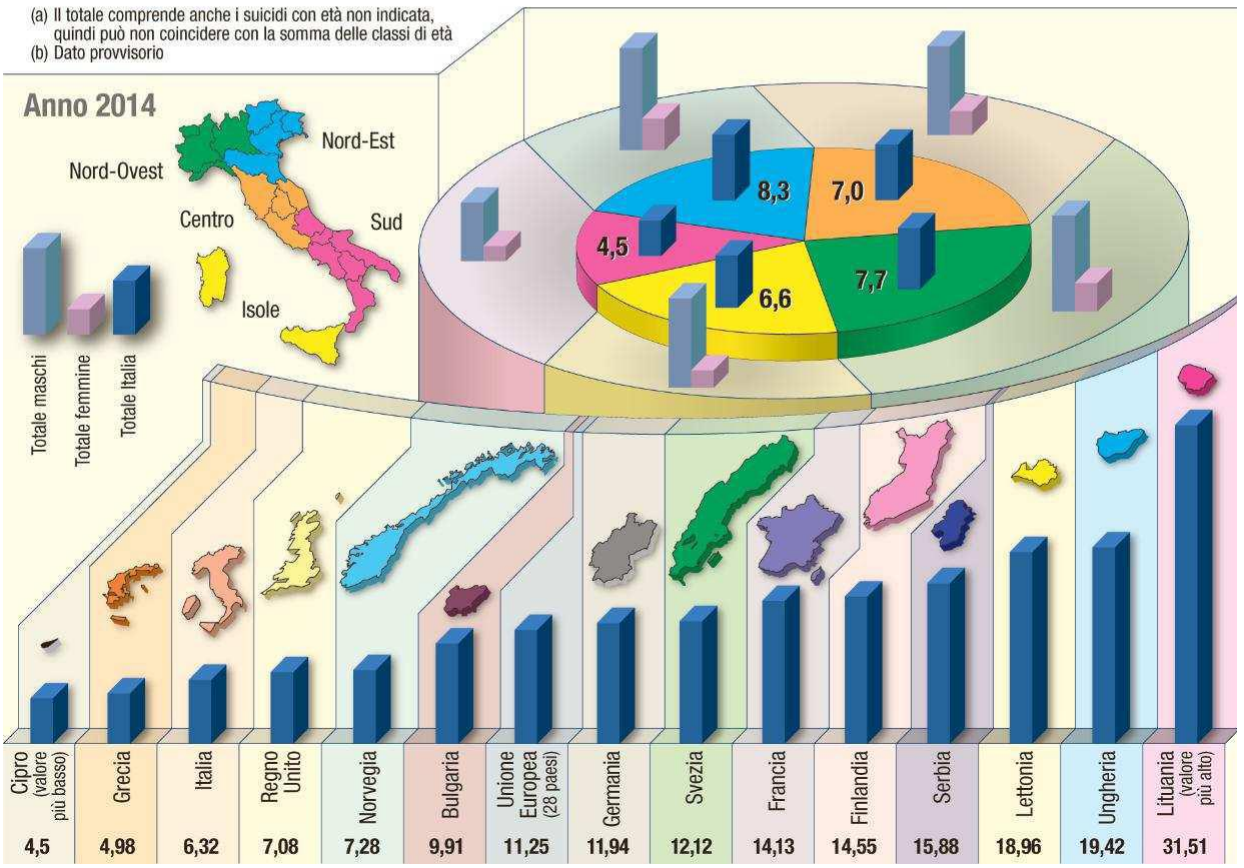
Per fortuna, tecnologie come lo smartphone sono più accessibili della fMRI e hanno cominciato a fornire una risposta all'esigenza di seguire i pensieri rivolti al suicidio nei periodi in cui il ri-

Il panorama italiano

I tassi di suicidio nel nostro paese sono tra i più bassi sia a livello mondiale sia in Europa (*tabella in basso*), con un'incidenza di 6,32 morti ogni 100.000 abitanti nel 2014. Anche in Italia, tuttavia, si registra un importante squilibrio tra i sessi, con 3065 uomini contro 870 donne (dati 2015), e per fasce di età: in entrambi i sessi la mortalità per suicidio aumenta notevolmente dopo i 45 anni, superando il 72 per cento dei casi. Diversa anche la distribuzione geografica, con l'8,3 ogni 100.000 abitanti nel nord-est e il 4,5 al sud. Da sottolineare l'assenza di correlazione con la malattia, fisica o mentale: per l'81,4 per cento dei suicidi registrati nel triennio 2011-2013 non c'è segnalazione di stati morbosi rilevanti.



(a) Il totale comprende anche i suicidi con età non indicata, quindi può non coincidere con la somma delle classi di età
(b) Dato provvisorio



Grafici di Danilo Sossi; fonte: ISTAT, *Indagine sulle cause di morte (RI)* (*dati italiani*) fonte Eurostat, dati standardizzati triennio 2011-2014 (*dati europei*)

schio è più alto. «Forse le persone a rischio di suicidio rispondono a situazioni di stress in modo più intenso di quelle non a rischio, ma non sempre si può indurre questo tipo di stress in laboratorio», dice Evan Kleinman, associato di ricerca del laboratorio di Nock. Si stanno però provando strumenti con cui monitorare i cambiamenti emotivi e fisiologici dei pazienti.

Vi sono app per smartphone che tengono i contatti con il paziente, o biosensori da tenere al polso che seguono conduttanza e temperatura della pelle, e la frequenza cardiaca. Se un paziente litiga con il coniuge a casa, i medici che lo seguono sapranno immediatamente che il suo livello di stress è salito. Queste tecnologie hanno contribuito a far riconoscere l'esigenza che i clinici valutino il rischio su tempi di ore, giorni o settimane più che di mesi o anni. Questi braccialetti, simili a quelli che si usano per monitorare l'esercizio fisico, attualmente sono in fase di prova in strutture di ricovero per adolescenti e per adulti, e i risultati non sono ancora arrivati, ma «noi pensiamo che siano molto promettenti», afferma Nock.

«Fai la domanda»

Ogni tecnologia preventiva richiede che le persone che hanno pensieri o comportamenti suicidi stiano ricevendo qualche forma di trattamento. Nella maggior parte dei casi, purtroppo, questo non accade. Anche chi va da un operatore sanitario non sempre riceve aiuto. Circa metà dei suicidi si erano recati in strutture mediche nei 30 giorni precedenti alla morte (non necessariamente per il rischio di suicidio). Ma meno della metà dei professionisti della salute mentale nel corso degli studi riceve un'adeguata formazione sulla valutazione del rischio di suicidio e i relativi interventi e nella maggior parte dei dipartimenti di medicina d'emergenza degli Stati Uniti le risorse disponibili per la salute mentale non vanno al di là di quelle di base.

Questa situazione sta cambiando. In tema di prevenzione del suicidio la parola d'ordine sta diventando sempre di più: «Fai la domanda». Per affrontare il suicidio in modo diretto, dobbiamo porre la questione in modo diretto. (E non è vero che così si mettono idee strane in testa alla gente.)

Nel febbraio 2016 l'ente che cura l'accreditamento degli ospedali ha raccomandato che tutti i pazienti siano sottoposti a screening per il rischio di suicidio. È stato un passo positivo, ma non tutte le strutture sapevano che fare. «C'è stata una corsa a inventare domande e questionari per conto proprio», dice Lisa Horowitz, psicologa infantile dei NIMH. «E i risultati o minimizzano i rischi o li esagerano, sovraccaricando risorse già insufficienti», per cui è in corso uno sforzo per assicurare che screening e *follow-up* siano adeguati. Nel 2017 ricercatori di varie parti degli Stati Uniti hanno riferito i risultati di uno studio finanziato dal NIMH per mettere alla prova uno strumento di screening in otto dipartimenti di emergenza. Da solo, lo screening non ha avuto effetti sui successivi tentativi di suicidio rispetto agli usuali trattamenti, ma con l'aggiunta di un intervento si è ottenuto una moderata ma significativa riduzione del 5 per cento del rischio di tentativi di suicidio.

Horowitz è ora alla testa di un progetto destinato a dotare il maggior numero possibile di ospedali di un breve strumento di screening diretto ai giovani tra i 10 e i 24 anni. Si chiama Ask Suicide-Screening Questions (ASQ) e la prima domanda è: «Nelle ultime settimane, hai mai desiderato di essere morto/a?». Horowitz sta ancora esaminando i dati delle decine di migliaia di ragazzi cui è stato sottoposto, ma si sente incoraggiata: «Molti temevano che si aprisse un vaso di Pandora, ma quello che stiamo trovando è che il rischio si può individuare ed è gestibile». Altro risultato assai notevole: il 95 per cento dei ragazzi cui è stato chiesto se volevano che venissero poste loro delle domande sul rischio di suicidio ha risposto di sì.

Per chi non frequenta le strutture mediche, i social media potrebbero offrire un altro tipo di segnali d'allerta. Bryan e colleghi hanno esaminato l'attività sui social media di 315 militari morti per suicidio o per altre cause. Sono andati in cerca di differenze nei contenuti nei 12 mesi precedenti la morte di ciascuno di essi: per esempio menzione di difficoltà relazionali o finanziarie, di pensieri e comportamenti suicidi o di problemi di salute o di rabbia. Individuando andamenti ricorrenti in questi contenuti, sono riusciti a differenziare con chiarezza tra chi era morto per suicidio e chi no. Uno studio derivato ha poi rivelato fino a quale punto fosse stata variabile la vita emotiva dei soldati lungo quei periodi.

Le nuove tecnologie usate per il monitoraggio hanno contribuito a far capire che i clinici devono valutare il rischio su tempi di ore, giorni o settimane anziché di mesi o anni

«Quando la gente si ammazza, nel periodo che porta alla morte ha giorni buoni e giorni cattivi», dice Bryan. «È una cosa tumultuosa». In passato, nell'analisi dei dati questi alti e bassi erano considerati rumore, ma rendendosi conto che in realtà contenevano informazioni essenziali – la variabilità stessa era il segnale, non il rumore – il gruppo di Bryan è riuscito a stimare, per le singole persone, quando era massima la probabilità che ponessero fine alla loro vita.

Ora i ricercatori stanno cercando di capire come applicare tutto questo in prospettiva. L'analisi dei social media può diventare più rilevante al di là dello studio di un medico, se amici e familiari sanno che cosa guardare, dice Bryan. Ma alcuni clinici possono accedere ai post e tweet diffusi senza restrizioni, e lo fanno. In più, Bryan sta già usando lo stesso approccio analitico nella valutazione dei dati, seduta per seduta, con i pazienti, e ha visto che potrebbe migliorare la capacità di seguire nel tempo e monitorare lo stato dei pazienti.

Un modo relativamente ovvio per abbassare i tassi di suicidio è semplicemente togliere le opportunità. Non tutti quelli che non riescono nel tentativo ci riprovano con successo: su 10 persone che tentano il suicidio nove sopravvivono e vivono la propria vita. Dopo anni di discussioni su costo ed efficacia, la spinta ad applicare questo tipo di «restrizione dei mezzi» sta finalmente dando risultati. Un rapporto pubblicato nel 2015 su «Lancet Psychiatry» ha riferito che installare reti di sicurezza in luoghi noti per i frequenti suicidi aveva ridotto i tassi di mortalità del 58 per cento (la media è passata da 5,8 a 2,4 all'anno). Lo scorso dicembre sono state installate barriere di sicurezza temporanee alte più di tre metri

sui parapetti preesistenti del ponte George Washington, che unisce New York e il New Jersey attraverso il fiume Hudson, dove nel 2017 si sono uccise 15 persone, e altre 68 ci hanno provato. Una barriera permanente farà parte di un intervento più ampio di restauro. Sul Golden Gate Bridge di San Francisco, che da quando fu aperto nel 1937 ha visto tuffarsi verso la morte più di 1700 persone, si sta costruendo una rete di acciaio inossidabile che si estende per sei metri oltre i marciapiedi pedonali. Nel 2012 sono state installate delle pareti metalliche perforate nell'atrio alto 12 piani della biblioteca dell'Università di New York intitolata a Elmer Holmes Bobst dopo che tre studenti vi avevano perso la vita lanciandosi nel vuoto.

Assai più numerose sono le morti che si potrebbero prevenire rendendo meno facile l'accesso alle armi da fuoco, che sono presenti in quasi la metà dei tentativi di suicidio, e oltre l'80 per cento di questi tentativi si conclude con la morte. Secondo uno studio apparso nel 2004 su «American Journal of Epidemiology», avere in casa un'arma da fuoco è associato a un più alto rischio di suicidio. Ma l'idea di togliere di mezzo queste armi come metodo di prevenzione del suicidio va a impigliarsi nella questione politicamente esplosiva del controllo delle armi, quindi è un'area in cui difficilmente ci saranno cambiamenti a breve scadenza.

Molte morti si potrebbero prevenire rendendo meno facile l'accesso alle armi da fuoco, la cui presenza in casa, secondo uno studio del 2004, è associata a un rischio più alto di suicidio

Trattamenti che funzionano

Migliorare predizioni e questionari – e gli stessi metodi per impedire i tentativi di suicidio – serve davvero solo se i clinici possono adottare trattamenti che riducono pensieri e comportamenti suicidi e ristabiliscono la qualità della vita. Un approccio degno di nota, la terapia dialettico-comportamentale (DBT), ha già dato buone prove, riducendo costantemente i tentativi di suicidio di circa la metà in alcune popolazioni di pazienti.

Sviluppata negli anni ottanta da Marsha Linehan, psicologa clinica dell'Università del Washington, per trattare pazienti suicidari con disturbi di personalità borderline, la terapia impone un regime intensivo di diversi incontri alla settimana per un anno e richiede una specifica formazione del terapeuta. Forse proprio le difficoltà nel mettere in campo un numero sufficiente di professionisti ben addestrati e l'impegno richiesto dal trattamento spiegano perché la DBT, da sola, non è riuscita a intaccare i tassi di suicidio.

Per avere un impatto più vasto, i trattamenti per il suicidio dovranno essere applicabili su vasta scala, con l'aggiunta di altre opzioni accessibili al di fuori delle strutture di pronto soccorso e magari anche scaricabili da negozi on line come iTunes Store. Uno studio del 2017 apparso sull'«American Journal of Psychiatry» ha mostrato che basse dosi di chetamina, un anestetico, portano a una significativa riduzione dei pensieri di suicidio nel giro di 24 ore, cioè con rapidità considerevolmente maggiore di altri antidepressivi.

Anche una app simile a un gioco sviluppata da Franklin e Nock sembra promettente; in essa immagini legate al suicidio – sangue, ferite e coltelli – sono accoppiate a fotografie repulsive di serpenti, ragni e simili. Poi si applicano i classici metodi di condizionamento – con cui si addestra una persona a modificare la propria naturale risposta a uno stimolo – per far sì che il soggetto trovi sgradevole l'idea del suicidio. In tre trial randomizzati con partecipanti che avevano pensato al suicidio di recente, giocare per qualche minuto al giorno ha dato costantemente una riduzione del rischio di comportamenti suicidi, anche se gli effetti sparivano quando si smetteva di giocare. Il gioco, chiamato Tec-Tec (dall'acronimo di «condizionamento terapeutico-valutativo» in inglese), è ora disponibile presso l'App Store.

Bryan si è concentrato sull'identificazione degli elementi che funzionano nella DBT e in altre terapie cognitive e sullo sviluppo di trattamenti che possano essere insegnati a persone diverse dagli operatori specializzati. «Gli ingredienti essenziali si riducono a due fattori sottostanti», dice. «Il primo è lo sregolamento delle emozioni, l'incapacità di identificare i propri sentimenti e poi di cambiarli. Il secondo elemento chiave è la flessibilità cognitiva, la capacità di generare opzioni, o di non lasciarsi imbrigliare in certi processi di pensiero, credenze o assunti». Questi due elementi possono essere affrontati con tattiche come training di consapevolezza (*mindfulness*) o rilassamento, ristrutturazione del pensiero negativo e incoraggiamento dei rapporti sociali. La terapia iniziale in 12 sedute di Bryan, da lui chiamata terapia cognitivo-comportamentale breve, comprendeva appunto questi elementi e riduceva i tentativi di suicidio del 60 per cento.

Inizialmente, il suo intervento di emergenza di 30 minuti era la parte più lunga della terapia. «L'idea era: facciamo questo nel momento in cui c'è una crisi, poi la persona entrerà in contatto con un trattamento di igiene mentale continuativo, e questo porterà alla soluzione a lungo termine», dice Bryan. Ma seguendo per sei mesi i pazienti su cui quello era stato l'unico intervento si è visto che l'effetto non solo durava, ma si rafforzava. «E questo ci ha portati a riflettere in modo diverso sui trattamenti», osserva. «Come mai una cosa tanto semplice è così potente? Questo è il punto in cui ci troviamo adesso. Che cosa dobbiamo fare per capire bene questa cosa e farla funzionare meglio?».

Porre in modo più ampio questa domanda potrebbe forse aviarci a raggiungere l'ambizioso obiettivo fissato dal partenariato privato-pubblico National Action Alliance for Suicide Prevention: ridurre i tassi di suicidio del 20 per cento entro il 2025. Arrivarci proverebbe in modo tangibile che la sofferenza e la disperazione che portano una persona a voler morire possono essere previste, affrontate e lenite. ■

PER APPROFONDIRE

Night Falls Fast: Understanding Suicide. Redfield Jamison K., Knopf, 1999.

Interventions to Reduce Suicides at Suicide Hotspots: A Systematic Review and Meta-Analysis. Pirkis J. e altri, in «Lancet Psychiatry», Vol. 2, n. 11, pp. 994-1001, novembre 2015.

Machine Learning of Neural Representations of Suicide and Emotion Concepts Identifies Suicidal Youth. Just M.A. e altri, in «Nature Human Behaviour», Vol. 1, n. 12, pp. 911-919, dicembre 2017.

NEUROSCIENZE

Le teorie sull'origine della coscienza si dividono in base alla sua localizzazione. Un dettaglio non da poco, che influenza la scelta delle metodologie per risolvere il «problema difficile» della scienza moderna

di Daniela Ovadia

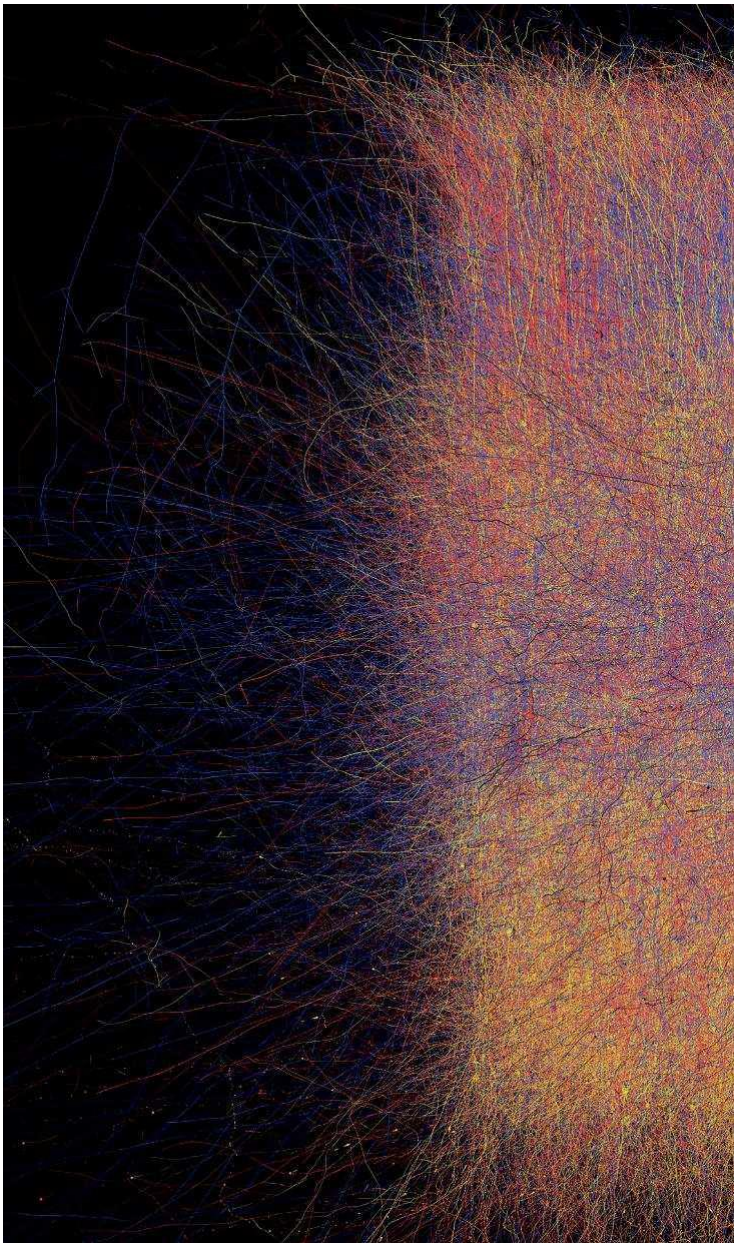
L'enigma della coscienza

Daniela Ovadia è giornalista scientifica e ricercatrice presso l'Università di Pavia, con una formazione in medicina, neuroscienze ed etica.

Ci guardiamo attorno, percepiamo il mondo che ci circonda: sentiamo gli odori, vediamo i colori, proviamo il calore del Sole sulla pelle. Siamo vivi. Siamo coscienti, dicono medici, filosofi e neuroscienziati, siamo consapevoli di ciò che stiamo provando. Sembra facile: eppure la definizione e lo studio della natura dell'esperienza cosciente sono tra i massimi problemi della scienza moderna, dopo aver attraversato la storia della filosofia classica, da Platone a Cartesio, da Kant a William James, padre della moderna psicologia.

Se si parla di coscienza, i filosofi hanno molto da dire. Quelli contemporanei cercano di dare forma a una teoria della coscienza che possa aiutare gli sperimentalisti a disegnare ricerche utili per risolvere l'enigma dell'origine dell'esperienza cosciente. Ed è proprio un filosofo della mente australiano, David Chalmers, ad aver introdotto, nel 1994, il termine *hard problem* (ovvero «problema difficile») per indicare la ricerca di una spiegazione sulla natura della coscienza, apparentata, nella sua complessità ed essenzialità a un altro grande hard problem della scienza moderna, ovvero la ricerca di un modello sperimentalmente verificato nella fisica della materia.

«La grande divisione teorica, oggi, è tra internalisti ed esternalisti. Per i primi la coscienza è un fenomeno interno al cervello; per i secondi, di cui faccio parte, la coscienza è legata a ciò che avviene esternamente al cervello», spiega Riccardo Manzotti, professore di filosofia teoretica allo IULM di Milano, ma anche ingegnere ed esperto di robotica e intelligenza artificiale.

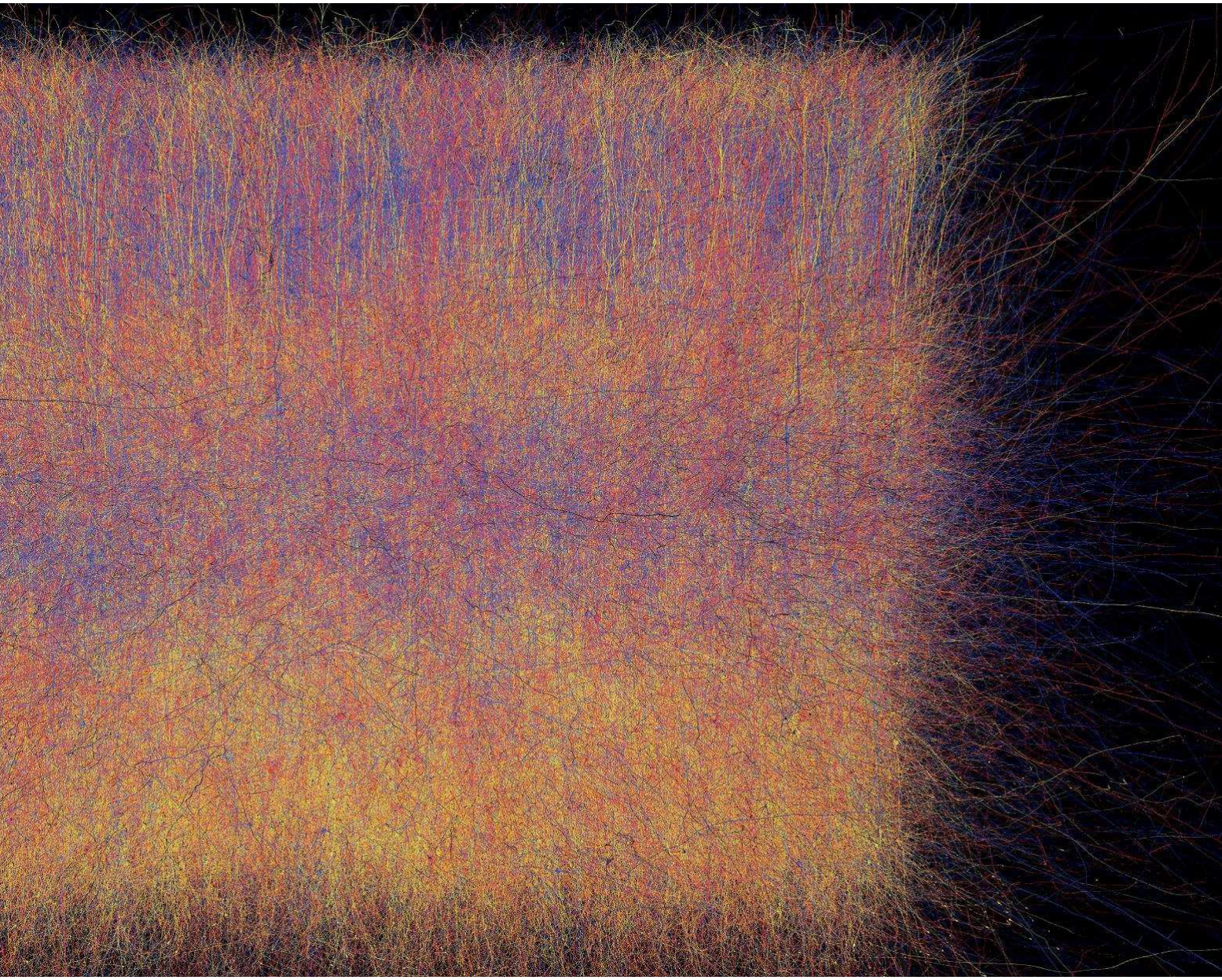


akindo/iStock (*pagine precedenti*)

La posizione enattivista o sensorimotoria

E se tra gli internalisti si trovano soprattutto neuroscienziati «classici», tra i secondi vi sono molti filosofi come Alva Noë, professore all'Università della California a Berkeley, o K. Kevin O'Regan, del Centre National de Recherche Scientifique di Parigi. Sia per Noë sia per O'Regan, la coscienza non risiede nel cervello, ma è un processo che richiede l'intero corpo, secondo una teoria che O'Regan ha chiamato «sensorimotoria» ed è oggi alla base della posizione enattivista.

«La mia teoria suggerisce un nuovo approccio al problema della coscienza», spiega O'Regan. «La domanda principale che mi pongo riguarda la natura dell'esperienza sensoriale: perché il rosso ci appare rosso invece che, per dire, verde? Oppure perché il suono di una campana ci appare tale? È il cosiddetto problema dei qualia, ovvero degli aspetti qualitativi, più che quantitativi, dell'esperienza umana». Tutte le altre questioni che normalmente associamo all'idea di sé e di coscienza, come il fatto di essere con-



Cortesia EPFL/Blue Brain Project

Ricreare digitalmente il cervello è uno degli approcci sperimentali utilizzati nello studio della coscienza. Sopra, la simulazione dell'attività elettrica in una «sezione cerebrale virtuale», realizzata nell'ambito del Blue Brain Project.

IN BREVE

Le moderne neuroscienze hanno chiarito alcuni aspetti dell'esperienza cosciente ma manca ancora una teoria della coscienza condivisa.
A confrontarsi oggi sono principalmente due approcci, che vedono la coscienza come proprietà emergente del cervello oppure come il prodotto dell'interazione con l'ambiente.
All'interno di queste due grandi divisioni teoriche vi sono però posizioni differenti e articolate, che applicano metodologie sperimentali diverse.
Definire la coscienza ha anche importanti implicazioni pratiche, che vanno dalla misura degli stati di coscienza nei soggetti in coma alla realizzazione di una coscienza artificiale.

sapevoli delle cose che accadono e la capacità di interagire con il mondo nel corso delle nostre azioni, non sono centrali in questa visione, perché consistono nell'analisi dell'interazione tra corpo e ambiente (ovvero dalla componente motoria). Sarebbero quindi problemi relativamente di facile risoluzione, una volta risolto l'hard problem.

«La maggior parte delle teorie della coscienza usate dai neuroscienziati riguarda in realtà questi aspetti più semplici dell'esperienza cosciente; li definisco semplici perché sono valutabili sperimentalmente attraverso lo studio della fisiologia cerebrale e del funzionamento dei neuroni. Ma non ci aiutano a risolvere il problema difficile perché c'è uno iato epistemologico, un salto, tra i meccanismi fisici del cervello e la reale, tangibile sensazione di che cosa è il rosso. L'esperienza sensoriale, nel mio modello, non è qualcosa che si genera nel cervello, ma una qualità della nostra interazione con l'ambiente, quindi necessita di un corpo».

L'approccio di O'Regan, che può sembrare molto teorico, è in-

vece utile per comprendere, per esempio, se sia possibile costruire una coscienza artificiale e quali elementi sono necessari perché un «oggetto», come un robot, possa diventare cosciente. La Commissione Europea lo ha finanziato con un *grant* ERC quinquennale, uno dei fondi di ricerca più prestigiosi, per portare avanti il progetto FEEL (che dovrebbe concludersi nel 2018), il cui scopo è sviluppare la teoria sensorimotoria su cinque diversi fronti: filosofico, matematico, studio psicofisico dei colori (come esempio di analisi e modellizzazione matematica di una esperienza sensoriale), sostituzione sensoriale (ovvero verifica di che cosa accade all'esperienza cosciente se si sostituisce un sistema sensoriale con un altro, come accade per esempio ai ciechi che devono interagire con l'ambiente attraverso altri sensi) e infine sviluppo infantile e robotico. «Capire come si genera l'esperienza cosciente nei bambini ci aiuta a mimarne lo sviluppo nei robot, attraverso modelli matematici, un obiettivo che portiamo avanti con un altro prestigioso grant europeo dedicato alle tecnologie emergenti e future», conclude O'Regan.

La mente diffusa o mente-mondo

Se la posizione enattivista o sensorimotoria della coscienza è esternalista perché non confina l'esperienza cosciente, ovvero la mente, nel cervello, rimane pur sempre ancorata all'interazione tra corpo e mondo che, per quanto importante, non sembra avere le proprietà che noi riscontriamo nella nostra esperienza quotidiana (la famosa sensazione di rosso). Molto più radicale è la posizione di Riccardo Manzotti – che ha appena pubblicato negli Stati Uniti il libro *The Spread Mind* (ORBooks, 2018) traducibile come mente diffusa o mente-mondo – e che si potrebbe definire un «esternalista estremo».

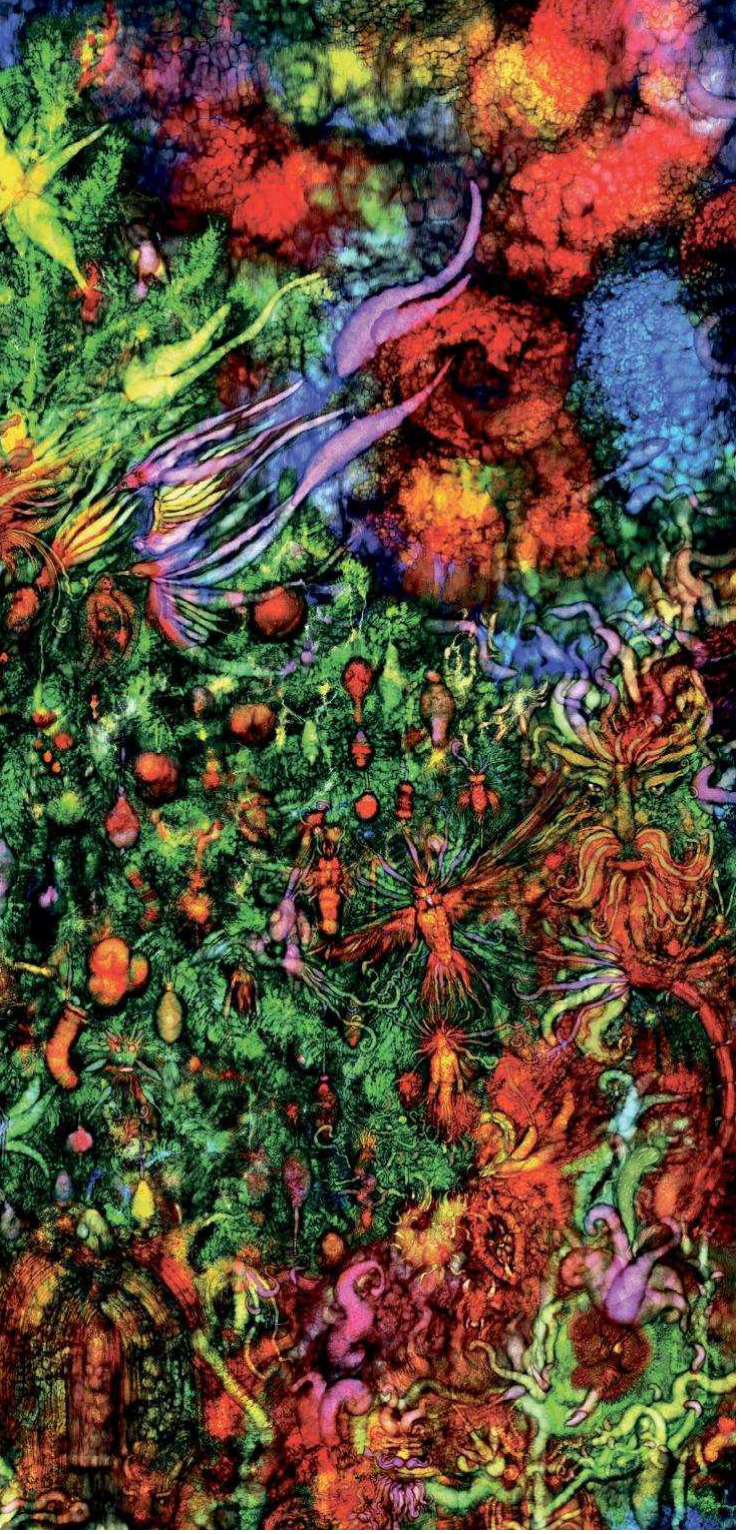
«L'approccio di O'Regan è definito enattivista perché basa la coscienza sulle azioni che il nostro corpo intrattiene con gli oggetti esterni. Se, da un lato, riconosce che le proprietà dei neuroni non sono sufficienti a spiegare la nostra mente, continua a considerare l'oggetto di cui facciamo esperienza come separato dalla coscienza stessa», specifica Manzotti. «La nostra esperienza cosciente, però, è diversa dal modo con cui interagiamo con l'oggetto, lo manipoliamo, lo tocchiamo. Il colore non è un'azione compiuta dal nostro corpo. Le azioni, che siano i movimenti degli occhi o toccare gli oggetti, sono a mio avviso degli strumenti per fare esperienza, ma non sono l'esperienza stessa. In che modo le mie azioni potrebbero spiegare perché percepisco il cielo come blu o lo zucchero come dolce?».

Per Manzotti, quindi, la coscienza di un oggetto non risiede nel corpo del soggetto che interagisce con esso e neppure nelle sue azioni, ma nell'oggetto stesso, per quanto possa apparire contrario al senso comune. Le proprietà soggettive e oggettive di un'esperienza sarebbero state separate solo per ragione di comodità scientifica, perché alcune sono più facilmente standardizzabili di altre e non perché interne o esterne al soggetto.

Per esempio, tutti pensiamo la temperatura sia una proprietà oggettiva, misurabile con un termometro, ma due persone diverse, nella stessa stanza, possono provare sensazioni opposte: una può aver freddo, l'altra caldo. La tradizione ha così distinto tra una temperatura oggettiva e una sensazione soggettiva; eppure, da un punto di vista fisico, le persone sono «termometri viventi» che reagiscono in modo diverso (a volte opposto) perché il loro corpo è diverso, e non perché ci sia una misteriosa soggettività.

«La realtà e la mia esperienza cosciente sono un continuum fisico, reale. Il mondo appare tale nel momento in cui un corpo seleziona una parte della realtà, questa parte è la sensazione ed è esterna al cervello (e al corpo). La mela è rossa perché una sua proprietà fisica è selezionata dal mio corpo. Questa proprietà, che è della mela, è allo stesso tempo la coscienza della natura rossa della mela. Secondo la mente-mondo (*spread mind*), la coscienza non è altro che il mondo esterno che agisce attraverso il nostro corpo», continua Manzotti. «Una dimostrazione empirica è fornita dal fatto che nessun essere umano, nemmeno durante il sonno o sotto l'azione di sostanze psicotrope, è mai riuscito ad avere coscienza di un colore alieno che non esiste nel mondo fisico. Se la coscienza fosse solo un prodotto del cervello, come dicono gli internalisti, ci sarebbero persone che vivono esperienze coscienti radicalmente irrea-

Russell Kightley/Science Photo Library



Ogni esperienza cosciente, secondo la filosofia della mente, ha un suo specifico aspetto qualitativo, detto qualia, percepibile solo dal soggetto che la sperimenta, rendendola quindi unica e irripetibile. A fianco, un'interpretazione astratta del concetto di qualia.

li, invece la nostra esperienza è sempre solo una ricombinazione di proprietà che il nostro corpo ha selezionato nel mondo esterno. In una frase: di che cosa è fatta la nostra mente? È fatta dal mondo che ci circonda in relazione con il nostro corpo».

Non solo: se la coscienza, come dicono gli internalisti, fosse una proprietà emergente del cervello, dovremmo essere capaci di osservarla. «Dal punto di vista scientifico, non esistono proprietà inosservabili, a meno di non resuscitare interpretazioni metafisiche, come l'esistenza dell'anima o di spiriti vitali. Non è assolutamente il mio caso: sono convinto che la coscienza sia di natura fisica», dice Manzotti. «I modelli internalisti di coscienza si limitano a cercare, e misurare, dei correlati, dei proxy dell'esperienza cosciente. È significativo che oggi nessuna legge scientifica ci permetta di passare dallo studio del livello neurale, cioè dallo studio dei correlati fisiologici dei neuroni, al piano esperienziale. Affermare di misurare la coscienza quando si misurano le proprietà della materia cerebrale significa compiere un errore di categorie, confondere un fenomeno con un altro e dare una cambiale esplicativa in bianco alle neuroscienze, senza sapere se saranno davvero capaci di risolvere il problema difficile. Oggi le neuroscienze non spiegano che cos'è la coscienza, ci consegnano un foglio con scritto "un giorno spiegheremo"».

La scuola cognitivista

Cambiare prospettiva sulla relazione tra coscienza individuale e mondo fisico può essere utile non solo sul piano speculativo, ma anche su quello pratico. Dalla teoria deriva, per esempio, la scelta degli strumenti con cui indagare. Per esempio, quando il matematico e fisico Roger Penrose ha avanzato, negli anni ottanta, l'ipotesi che la coscienza possa essere il risultato di fenomeni quantistici a livello dei microtubuli dei neuroni (ipotesi decisamente internalista e mai dimostrata sperimentalmente), ha però indicato un nuovo strumento di studio della fisiologia della coscienza, cioè l'uso della meccanica quantistica invece che della meccanica classica. Come Penrose, coloro che studiano la coscienza studiando il cervello sono per lo più internalisti, e quindi lo sono anche la maggior parte dei neuroscienziati.

La scuola cognitivista, per esempio, afferma che la coscienza si genera a livello dei neuroni quando questi sono impegnati nell'elaborare grandi quantità di informazioni provenienti sia dall'ambiente esterno sia dall'attività cognitiva interiore del soggetto. Le singole attività si svolgono nelle diverse aree del cervello, ma si coordinano a livello della corteccia cerebrale.

A questa visione si deve il modello dello spazio di lavoro globale (*Global Workspace Model*, o GWM) proposto per la prima volta da Bernard Baars, neurobiologo dell'Università di La Jolla, in California, nel 1988. «L'idea al centro del modello di global workspace è che il contenuto cognitivo cosciente sia disponibile in tutto il cervello allo stesso tempo, a disposizione dei diversi processi cognitivi, per esempio l'attenzione, la memoria o la capacità di esternare verbalmente il pensiero», spiega il neuroscienziato francese Jean-Pierre Changeux che, insieme al collega Stanislas Dehaene, ha contribuito a studiare il GWM nell'uomo. «Le percezioni, i giudizi e gli altri messaggi sono conservati in un sottotipo di memoria a breve termine. Quando le informazioni raccolte vengono trasmesse attraverso l'intero cervello emerge l'esperienza cosciente che si manifesta, per esempio, attraverso il coinvolgimento del sistema motorio che spinge il corpo all'azione. Il fatto che il contenuto sia globalmente disponibile è necessario per spiegare l'associazione della coscienza con i processi cognitivi integrativi, come l'attenzione, i processi decisionali o la scelta di un'azione».

Il modello di global workspace non risolve l'hard problem proposto dai filosofi, ma da quando è disponibile la risonanza magnetica funzionale è di grande utilità nel campo medico. «Dato che la coscienza necessita dell'attivazione concomitante e coor-

dinata di più funzioni cerebrali, la semplice attivazione di un'area sensitiva del cervello alla risonanza magnetica, per esempio quella visiva, non dimostra che la persona sia cosciente», continua Changeux. «Significa solo che lo stimolo visivo ha colpito la retina che ha inviato l'informazione alla parte di cervello che la deve processare. Se però l'informazione resta lì, confinata, la persona non ne è cosciente, ovvero consapevole».

Lo spazio di lavoro globale presuppone che l'informazione che proviene dal mondo esterno debba competere per l'attenzione: diventiamo consapevoli di qualcosa, per esempio del suono del telefono, solo se ha il sopravvento su tutte le altre informazioni che in quel momento il cervello sta elaborando. Dal punto di vista neurofisiologico, lo stimolo sensitivo attiva i neuroni dotati di lunghi assoni che collegano le diverse aree della corteccia tra di loro, generando un preciso pattern, ovvero uno schema di attività cerebrale. Ogni pattern di attivazione globale può inibire gli altri, facendo quindi prevalere un'informazione sull'altra, un'esperienza cosciente sull'altra. «Questa teoria permette anche la creazione di modelli matematici, perché stabilisce che la presenza della coscienza è una funzione non lineare della salienza dello stimolo, cioè della sua capacità di monopolizzare l'attenzione. È molto importante per lo sviluppo dell'intelligenza artificiale, perché ci spiega come creare una gerarchia tra gli stimoli a cui la macchina è sottoposta».

Dehaene e Changeux hanno sottoposto la propria teoria alla prova sperimentale nell'uomo, andando a cercare – con la risonanza magnetica o misurando l'attività elettrica del cervello – le aree cerebrali e i gruppi di neuroni in cui si localizza lo spazio di lavoro globale. Le regioni attivate mostrano una densa rete di neuroni interconnessi, in particolare cellule piramidali, in grado di collegare tra loro la corteccia prefrontale, il lobo parietale inferiore, il lobo temporale anteriore e mesiale e altre regioni del cervello. E proprio gli assoni lunghi fanno da collegamento.

Il GWN non è l'unico modello in cui si prevedono contenuti in competizione per il raggiungimento del livello cosciente. Nella teoria della mente a confronto, proposta nel 1991 dal neurofilosofo Daniel Dennett, i sistemi cognitivi producono invece contenuti in parallelo, e il contenuto cosciente è solo quello che riesce ad avere il maggior impatto sul sistema. La metafora che Daniel Dennett utilizza è quella della fama. Come per un artista, così anche per le informazioni presenti nel cervello non è possibile determinare a priori il momento in cui una di esse diventerà famosa: lo si può sapere solo retrospettivamente. Secondo Dennett, quindi, l'unico hard problem presente nello studio della coscienza è capire i meccanismi di accesso all'informazione e il meccanismo dell'influenza globale sul sistema.

Un pezzo per volta

C'è anche chi, come Giulio Tononi, neuroscienziato italiano che lavora all'Università del Wisconsin, cerca di risolvere il più difficile dei problemi affrontandolo pezzo per pezzo. La sua teoria dell'informazione integrata (IIT) ha lo scopo di spiegare cos'è la coscienza partendo dai requisiti dei sistemi fisici che la rendono possibile, rendendo quindi possibile anche misurarne la quantità e la qualità.

«L'approccio consueto, ovvero partire dallo studio delle caratteristiche del cervello per cercare di derivarne in qualche modo l'esperienza soggettiva – ossia andare dalla fisica alla fenomenologia – si scontra inevitabilmente con l'hard problem», spiega Tononi. «L'IIT rovescia i termini della questione: invece di partire da come è fatto il cervello o dalle funzioni che svolge, comincia con l'identificare le proprietà essenziali della coscienza stessa per derivarne i requisiti necessari e sufficienti perché un substrato fisico renda possibile l'esperienza soggettiva».

È così che Tononi ha stabilito le cinque proprietà essenziali della coscienza: l'esperienza esiste per il soggetto che la esperisce e non per un osservatore esterno; è strutturata perché ha vari contenuti in relazione tra loro; è informativa, cioè specifica e diversa da tutte le altre; è integrata (cioè è una e irriducibile); e infine è definita in termini di contenuti, non uno di più né uno di meno. «Ne deriva che qualsiasi substrato fisico per la coscienza, che sia un cervello biologico o sintetico deve soddisfare questi cinque requisiti» spiega ancora Tononi. La forza dell'IIT, ciò che ne ha fatto una delle teorie sperimentalmente più testate negli ultimi anni, è la possibilità di dare a tutto ciò una veste matematica, ovvero tradurre l'esperienza cosciente nel linguaggio universale per eccellenza. Tononi, che deriva la sua idea da un'evoluzione della teoria del nucleo neurale dinamico (il «cuore» della coscienza) del suo maestro Gerald Edelman, ha stabilito anche che l'unità di misura fondamentale dell'informazione integrata, chiamata *Phi*, è irriducibile, cioè indica se e quanto il tutto non può essere ridotto alle sue parti. La conseguenza di ciò è che la coscienza diventa misurabile come qualsiasi proprietà fisica.

La teoria della informazione integrata ha lo scopo di spiegare la coscienza partendo dai requisiti dei sistemi fisici che la rendono possibile

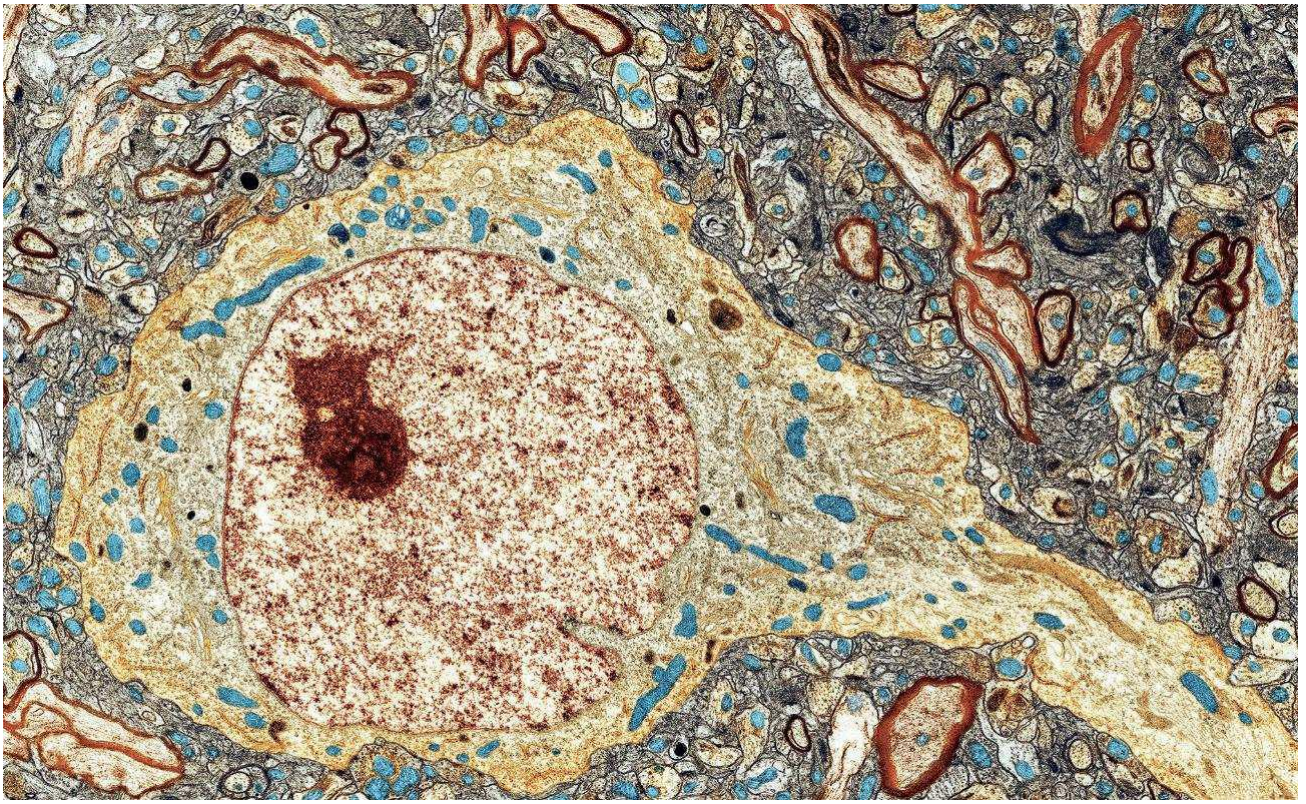
Il coscienziometro

Il gruppo di Marcello Massimini, dell'Università di Milano-Bicocca, ha messo infatti a punto un «coscienziometro» basato sull'IIT, che sfrutta la stimolazione magnetica transcranica e la misurazione dell'attività elettrica del cervello per leggere l'integrazione dell'informazione (quindi il suo emergere come coscienza) dalla registrazione delle risposte cerebrali.

Le sperimentazioni di Massimini mostrano che esiste una relazione tra questa misurazione e lo stato clinico degli individui, siano essi in coma per lesioni cerebrali, sotto anestesia o addormentati. Il modello di Tononi ha contribuito anche a chiarire uno dei dubbi che i neuroscienziati hanno da quando sono in grado di guardare i tessuti nervosi col microscopio: come mai il cervelletto, struttura ricchissima di neuroni, può essere lesionato o addirittura asportato in individui che rimangono comunque coscienti. La risposta sta proprio nell'integrazione dell'informazione: il cervelletto è organizzato in moduli funzionali separati, che non interagiscono, se non in minima parte, tra loro.

I modelli neurali (cioè basati sulle proprietà del cervello e delle sue cellule) della coscienza proposti dai diversi scienziati si differenziano per alcuni particolari: se per il britannico Anyl Seth la coscienza è un insieme di funzioni prodotte dal cervello e non esiste quindi nessun «problema difficile», ma solo la necessità di capire fino in fondo tutti i processi cerebrali (modello riduzionistico), per lo statunitense Christof Koch la coscienza è una proprietà emergente dei processi neurali: non è la semplice somma delle parti del funzionamento cerebrale, ma qualcosa che compare quando la complessità del sistema cresce, secondo uno schema ben noto in altre discipline come la fisica.

La comprensione sempre più approfondita della neurofisiologia è una condizione necessaria, ma forse non sufficiente, per la soluzione del problema della coscienza. Nell'immagine, micrografia elettronica di neurone ippocampale.



Thomas Deerinck, NCMIR/Science Photo Library

Neuroni e simulazioni

Simulare il cervello in un computer, ricreando matematicamente il funzionamento dei singoli neuroni, è la strada che molti neuroscienziati stanno cercando di intraprendere per verificare le ipotesi di Seth, Koch e anche di Tononi, e per provare a creare una coscienza artificiale. È quanto si propone di fare lo Human Brain Project, il progetto decennale finanziato dall'Unione Europea con circa un miliardo di euro, seppure l'idea iniziale di arrivare a un supercomputer cosciente attraverso la modellizzazione della mente umana sia stata molto ridimensionata rispetto alle aspettative iniziali. Il progetto, però, va avanti. È possibile che si fermi alla simulazione di qualche funzione senza arrivare alla piena integrazione, oppure che verifichi se processi quali l'integrazione dell'informazione siano rilevabili anche nelle macchine.

Il prossimo 21 giugno lo Human Brain Project farà convergere a Barcellona i massimi esperti di coscienza per un congresso che vuole fare il punto sulle analogie tra le diverse teorie, includendo anche chi, come David Chalmers o il filosofo statunitense Ned Block, non concorda del tutto con un'ipotesi «meccanicistica» della coscienza, ma propone modelli che integrano l'approccio cognitivista con quello fenomenologico, legato all'esperienza.

«Parleremo anche di alcuni dati interessanti prodotti dal gruppo di Idan Segev, della Hebrew University, che ha confrontato la capacitanza, una proprietà fisica di base del neurone, in neuroni di ratto e neuroni umani», spiega Massimini. «In particolare, ha scoperto che la capacitanza dei neuroni umani implica una maggiore solidità e affidabilità delle connessioni. È solo un pezzo del puzzle, ma potrebbe dirci qualcosa sulla coscienza e sull'intelligenza degli animali e dell'uomo. In generale osserviamo il comportamento intelligente degli altri esseri viventi e inferiamo il loro stato di coscienza. Ma intelligenza e coscienza possono essere dissociate: lo abbiamo scoperto studiando sistemi come quello cerebellare, che contribuiscono ad alcune forme di apprendimento ma non alla coscienza. Questa separazione è importante per lo sviluppo della robotica e dell'intelligenza artificiale, come è facile intuire: possiamo avere macchine intelligenti ma non coscienti. E ci può illuminare sulla coscienza nelle altre specie. Che cosa si prova a essere un pipistrello, si chiedeva il filosofo Thomas Nagel. Che cosa si prova a essere un polpo, animale di un comportamento complesso. Il polpo è una "anima senziente" o semplicemente un network di neuroni dotati di plasticità sparsi lungo otto tentacoli? Solo un modello matematico della coscienza e una conoscenza precisa delle basi neurofisiologiche di ciò che accade nel cervello quando si prova un'esperienza potranno aiutarci a capirlo».

Insomma, la caccia alla coscienza continua. ■

PER APPROFONDIRE

Why red doesn't sound like a bell. O'Regan K., Oxford University Press, 2011.

Nulla di più grande. Dalla veglia al sonno, dal coma al sogno, il segreto della coscienza e la sua misura. Tononi G. e Massimini M., Baldini e Castoldi, 2013

Strumenti per pensare. Dennett D., Raffaello Cortina Editore, 2014.

Cos'è la coscienza? Chalmers D., Castelvecchi, 2014.

Coscienza e cervello. Come i neuroni codificano il pensiero. Dehaene S., Raffaello Cortina Editore, 2014.

The spread mind: why consciousness and the world are one. Manzotti R., OR Books, 2017.

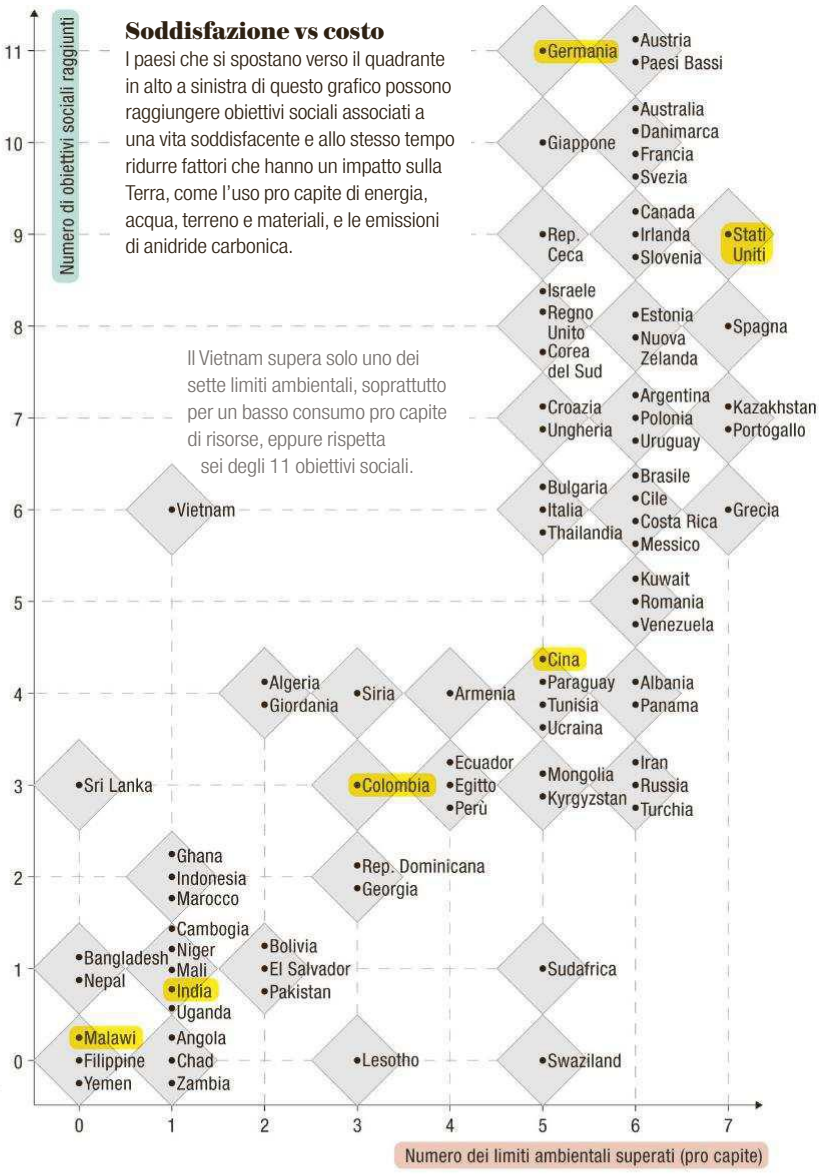
Il problema della coscienza. F. Crick e C. Koch, in «Le Scienze» n. 291, novembre 1992.

Una buona vita per tutti

Possiamo vivere meglio senza saccheggiare il nostro pianeta?

Molti paesi ricchi hanno raggiunto una serie di obiettivi sociali che possono dare una buona qualità della vita ai cittadini, come sottolineato dagli Obiettivi per lo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite. Per farlo, però, hanno superato la loro quota di risorse naturali e i limiti di impatto ambientale necessari a salvaguardare il pianeta, secondo uno studio (*in alto a destra nel grafico principale*). I paesi meno ricchi usano le risorse in modo più moderato e hanno impatti minori, tuttavia raggiungono meno obiettivi sociali (*in basso a sinistra nel grafico principale*). La soluzione: «I paesi ricchi possono consumare meno, senza diminuire la qualità della vita», afferma Daniel W. O'Neill, dell'Università di Leeds, nel Regno Unito, che ha diretto la ricerca. Questo libererebbe risorse per i paesi meno ricchi, permettendo loro di migliorare la qualità della vita (*grafici in basso*) rispettando allo stesso tempo i limiti di sostenibilità ambientale.

Mark Fischetti



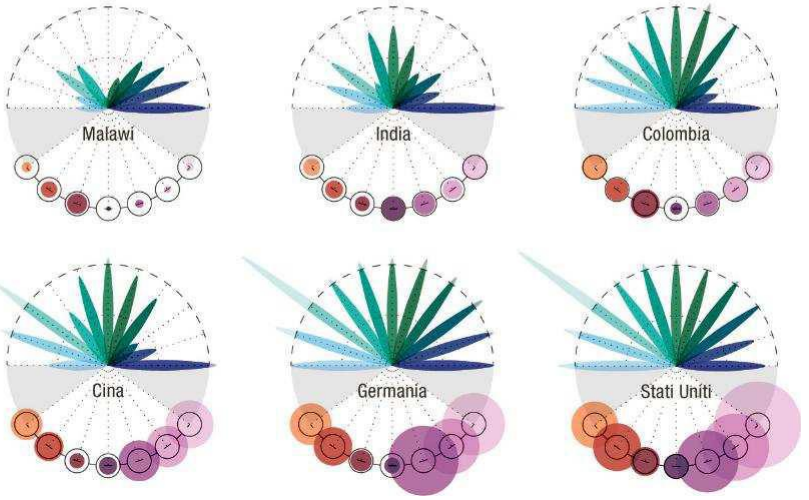


Grafico di Federica Fragapane; fonte: *A Good Life for All Within Planetary Boundaries*, di Daniel W. O'Neill e altri, in «Nature Sustainability», Vol. 1, 5 febbraio 2018. https://goodlife.leeds.ac.uk

di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso della disinformazione nei media

Il verme del razzismo

Le conseguenze di una grave parassitosi all'origine di uno stereotipo razzista

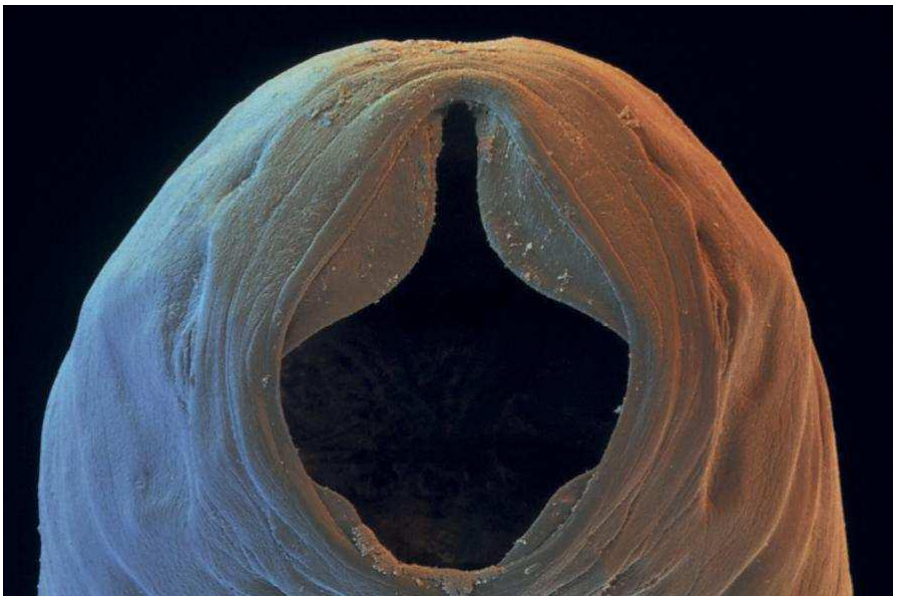
Fra parassitologia e razzismo non sembra esserci nulla in comune, finché non ci si imbatte in storie come quella di *Necator americanus*, un piccolo parassita umano le cui larve vivono nel terreno umido e caldo di vari continenti, in particolare in quello americano, e infettano l'ospite penetrandone la pelle, tipicamente attraverso i piedi scalzi. Il suo omologo mediterraneo, africano e asiatico è *Ancylostoma duodenale*, che non ha un nome drammatico come *Necator americanus* (letteralmente «assassino americano»), ma fa altrettanti danni.

Infatti, una volta entrato attraverso la cute, *N. americanus* intraprende un'odissea che lo porta a percorrere i vasi sanguigni, il cuore e i polmoni, fino a raggiungere la trachea, dove viene deglutito e passa nell'esofago, transita dallo stomaco e arriva a destinazione nel duodeno. Qui si fissa alla mucosa intestinale, nutrendosi di sangue dell'ospite, e matura. Quando è adulta e fecondata, la femmina di *N. americanus* depone ogni giorno migliaia di uova, che escono dal malcapitato ospite insieme alle feci, pronte a infettare il prossimo ospite scalzo in mancanza di servizi igienici adeguati.

È una storia che già così smonta parecchi miti romantici sulla bellezza della vita a contatto con madre natura, ma non è finita. Il parassita, infatti, causa nell'ospite anemia, crescita rallentata, spossatezza, disturbi d'attenzione e un quoziente intellettivo ridotto, tanto che si sospetta che all'epoca della guerra civile americana la diffusione vastissima di *N. americanus* negli Stati più meridionali del paese abbia contribuito notevolmente a generare lo stereotipo razzista dell'americano del sud stupido e pigro.

Nei primi anni del Novecento fu stabilita scientificamente una correlazione fra l'infezione da *N. americanus* e la «pigrizia del sud» e iniziò una campagna per debellare il parassita, incoraggiando l'uso di antiparassitari e l'adozione di rimedi semplici come l'uso delle scarpe e di latrine. All'inizio la campagna incontrò una notevole opposizione, perché promossa dagli Stati del nord vincitori della guerra: gli abitanti del sud si sentirono offesi dall'accusa di essere infetti, si ribellarono contro l'imposizione che arrivava dal nord «scientifico» e arrivarono a dire che la malattia non esisteva. Agli antivaccinisti di oggi fischieranno le orecchie.

Questa vicenda storica è riemersa di recente grazie a uno studio della National School of Tropical Medicine del Baylor College of Medicine, in Texas, che ha rivelato che in realtà *N. americanus* non è mai scomparso: anzi, in alcune zone dell'Alabama il 34 per cento delle persone esaminate è risultata positiva al parassita. Non in qualche paesino remoto dell'Africa o dell'Asia, ma nel cuore di una superpotenza tecnologica e nel XXI secolo, dove ci sono abitanti che non possono permettersi fognature e dove lo Stato non interviene per realizzarle e quindi i liquami, in caso di pioggia, allagano il terreno e le case, perpetuando così una condizione di povertà assoluta da cui la debolezza e il ritardo cognitivo causati da *N. americanus* rendono ancora più impensabile uscire e alimentando gli stereotipi razzisti.



David Scharf/AGF/SPL

L'ampia diffusione del verme *N. americanus* (sopra micrografia dell'apparato buccale) nel meridione degli Stati Uniti contribuì allo stereotipo dell'americano del sud stupido e pigro.

Viene da chiedersi quante delle presunte differenze intrinseche sostenute dai razzisti abbiano in realtà origini biologiche esterne, dovute all'ambiente ostile, ed emerge l'importanza della scienza nell'estirpare non solo il parassita intestinale ma anche quello mentale della discriminazione.

Ma c'è anche un'altra lezione da considerare: l'implacabile, indifferente crudeltà del ciclo vitale di creature come l'«assassino americano» mostra che la visione romantica della natura è un lusso pericoloso che si può permettere solo chi vive isolato da quella stessa natura.

di Beatrice Mautino
Biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti, l'e-book *Stamina. Una storia sbagliata* (2014) e *Contro natura*, con Dario Bressanini (Rizzoli, 2015)

Pericolo solarium

Il legame tra lettini abbronzanti e melanoma è dimostrato da numerose ricerche

Con il Sole non si scherza, recita un noto detto popolare. Lo hanno capito bene, loro malgrado, in Islanda, dove a partire dalla metà degli anni ottanta è scoppiata la moda dei lettini abbronzanti. Sull'isola, si sa, il Sole si vede solo per pochi mesi l'anno e l'abbronzatura «artificiale» sembrava una facile alternativa per sopravvivere al lungo periodo buio. L'entusiasmo per i solarium si è però un po' spento quando, parallelamente alla diffusione dei lettini abbronzanti, si sono iniziati a registrare sempre più casi di melanoma fino ad arrivare a quella che gli esperti hanno definito un'epidemia. Fino agli anni novanta, il popolo islandese aveva la più bassa incidenza di tumori alla pelle dei paesi del nord, tra la fine degli anni novanta e i primi anni duemila sono schizzati al primo posto, tanto da convincere le autorità a fare una campagna informativa capillare che ha ridotto l'uso dei lettini abbronzanti e, di conseguenza, anche l'incidenza del melanoma.

Per capire la natura di questa relazione partiamo dalle basi. Quando si parla di raggi UV li si mette tutti nello stesso calderone, anche se in realtà sono molto diversi, per quantità, intensità e danni che possono provocare. I preponderanti sono gli UVA che costituiscono più del 90 per cento dei raggi ultravioletti che incontriamo ogni giorno. Il resto è lasciato agli UVB che, fortunatamente, sono bloccati per la maggior parte dal grande filtro solare che sta sopra alle nostre teste, lo strato di ozono. Gli UVB sono pochi, si fermano negli strati più superficiali della pelle, ma sono i principali responsabili delle scottature, motivo per cui storicamente le creme solari si sono concentrate su di loro. Gli UVA, invece, sono più subdoli, perché non ci fanno scottare, ma penetrano nella pelle in profondità e lì stimolano la formazione di radicali liberi che danneggiano sia le strutture che sorreggono la pelle, provocando rughe e invecchiamento cutaneo, sia il DNA delle cellule, inducendo mutazioni che aumentano il rischio di sviluppare tumori.

La conferma della loro colpevolezza è arrivata nel corso degli anni dai molti studi epidemiologici effettuati in tutto il mondo. Un primo dato arriva dall'osservazione delle differenze di incidenza in relazione alla distanza dall'equatore. Una ricerca, effettuata in Nuova Zelanda, che assieme all'Australia registra la più alta percentuale di melanoma al mondo, dimostra che il rischio di contrarre questo tipo di tumore cresce del cinque per cento a ogni grado di latitudine di avvicinamento all'equatore. Per escludere la componente genetica, un altro studio ha misurato l'incidenza del melanoma in persone immigrate in Australia a età diverse e per tempi diversi. Se la componente genetica fosse preponderante, queste persone avrebbero dovuto mantenere un'incidenza paragonabile a quella delle popolazioni da cui provenivano. Viceversa, l'incidenza si sarebbe dovuta via via avvicinare a quella dei nativi. I risultati dello studio hanno dato ragione a quest'ultima ipotesi, dimostrando che chi arriva da adulto ha in media un rischio di tre volte inferiore di contrarre un melanoma di chi invece vive da sempre in Australia, ma per chi arriva da bambino, il rischio diventa via via identico.

Parallelamente, l'insieme della letteratura scientifica sull'uso di lettini solari dimostra non solo che il rischio di sviluppare un melanoma cresce del 75 percento nelle persone che iniziano a sottoporsi a sedute abbronzanti prima di aver compiuto trent'anni, ma anche che il rischio aumenta ulteriormente se le sedute sono frequenti, come ha confermato «sperimentalmente» l'involontario esperimento islandese.

In Islanda, la moda dei lettini abbronzanti ha fatto saltare la popolazione dell'isola dall'ultimo al primo posto tra i paesi del nord per incidenza dei tumori della pelle.

Per questi e molti altri motivi, l'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) dopo un processo di revisione molto lungo, ha inserito i lettini solari nell'elenco dei «sicuri cancerogeni». D'altronde, l'alternativa «naturale» alla tintarella, l'esposizione al Sole, era già stata inserita nella stessa lista nel 1992. Con il Sole, dicevamo, non si scherza.

LUNAMARINA/iStock

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello.*

Un mondo di latte

Le caratteristiche di questo alimento sono uniche della specie che lo produce

Tra le migliaia di alimenti diversi che mangiamo nel corso della nostra vita, solo uno è stato prodotto in natura appositamente ed esclusivamente per il consumo umano: il latte materno. Ogni cucciolo di mammifero all'inizio si nutre esclusivamente di latte, l'alimento completo per definizione, da cui trae tutto quello che gli serve per crescere: acqua, sali minerali, proteine, grassi, vitamine e molte altre sostanze necessarie per lo sviluppo.

Capita spesso di leggere titoli come: *Il latte di capra è il più simile a quello umano* o *Latte d'asina: un ottimo sostituto del latte materno*. O addirittura che «il succo di fico biologico appena spremuto è simile nella composizione al latte materno». A volte invece del fico è il succo d'uva, o di mela o di altri frutti. La verità è che il latte umano è unico e nessun altro latte di mammifero è uguale, anche se per motivi di «vicinanza genetica» quello di scimmia gli si avvicina. E ovviamente confrontare un succo di frutta con il latte è semplicemente un'enorme sciocchezza.

Il lattosio, lo zucchero presente nel latte, fornisce energia ai neonati. Il latte umano ne è particolarmente ricco: sette grammi ogni 100 grammi di latte. Quello di altre specie ne contiene meno: 4,9 grammi quello di vacca, 4,7 grammi quello di capra e 6,1 grammi quello d'asina. Il latte dei mammiferi marini, come la balena e la foca, ne contiene pochissimo, anche meno dell'uno per cento.

I cuccioli di mammifero per crescere hanno bisogno di proteine. Il latte umano ne ha l'1,1 per cento, assai meno di quello di vacca, che ne ha il triplo, o di pecora, che ne ha più del quadruplo. Curiosamente il latte di topo è molto proteico: il nove per cento.

Anche i grassi sono necessari al neonato sia come fonte energetica sia per la crescita, per esempio per costruire le membrane cellulari. Il latte umano ne ha un po' di più del latte vaccino e molto di più di quello d'asina che ne ha solo lo 0,6 per cento. Ancora una volta il latte dei mammiferi marini è diverso: il 40-50 per cento del latte è costituito da grassi, per sopravvivere a temperature molto più basse dei mammiferi terrestri.

Se per un qualsiasi motivo una madre non può dare il proprio latte al suo neonato, sono disponibili vari prodotti che cercano, per quanto possibile, di mimare la composizione del latte materno almeno nelle sue componenti principali, specialmente quella grassa. Se ci ricordiamo che il grasso del latte vaccino è il burro, non dobbiamo stupirci del fatto che anche i grassi del latte materno sono in buona parte saturi: circa il 40 per cento, di cui la metà acido palmitico, necessario per la crescita del neonato. C'è poi l'acido oleico, monoinsaturo, in quantità variabile tra il 30 e il 35 per cento. In terza posizione c'è l'acido linoleico, polinsaturo, ne seguono poi decine di altri.

Data la particolare composizione dei grassi del latte materno, non esiste alcun olio vegetale che sia simile. L'olio di oliva, per esempio, ha una prevalenza di acido oleico, il 75 per cento, e solo il 15 per cento di acido palmitico. Per ottenere una componente grassa simile a quella del latte umano le aziende miscelano grassi alimentari provenienti da molte fonti diverse, di solito vegetali. E poiché c'è bisogno di una fonte di acido palmitico ecco che nella formulazione di molti latti in polvere spesso troviamo l'olio di palma, che ne contiene il 44 per cento. Anche il burro di cacao ne è ricco ma ha un costo superiore.

Nessun latte in polvere però può contenere le migliaia di molecole bioattive diverse che la mamma passa al bambino e che servono al suo sviluppo, alla formazione dei suoi organi e al suo sistema immunitario. È per questo che le autorità sanitarie mondiali raccomandano, quando possibile, l'allattamento esclusivo al seno nei primi sei mesi di vita, e il mantenimento fino a due anni e oltre accompagnato con cibo solido: perché nessun latte alternativo può essere identico a quello materno.

100 grammi di latte contengono...
(in grammi)

Tipo di latte	Proteine	Grassi	Carboidrati
Vacca	3,3	3,7	4,9
Uomo	1,1	4,2	7,0
Bufala	4,1	9,0	4,8
Capra	2,9	3,8	4,7
Pecora	4,6	7,2	4,8
Asina	1,9	0,6	6,1
Elefante	4,0	5,0	5,3
Scimmia rhesus	1,6	4,0	7,0
Topo	9,0	13,1	3,0
Balena	10,9	42,3	1,3
Foca	10,2	49,4	0,1

Fonte dati: *Fundamentals of Dairy Chemistry*, di B. Horton Webb, A.H. Johnson, J. A. Alford, Avi Pub. Co., 1974.

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Di gambe e di stinchi

Bella come sempre, elegante come ogni volta che l'occasione richiede di mostrarsi in pubblico, flessuosa come non mai, trasuda alterigia dagli occhi grandi e lucenti. Stasera, però, dalla posizione leggermente innalzata del naso si legge anche un'ombra di aristocratica indignazione.

«È tutta colpa tua – sibila Alice all'indirizzo di Rudy, mentre la micia le si accoccola in grembo volgendo sdegnosa le terga al resto dei convitati – hai dato troppa confidenza a quel cane. Eppure lo sai, che Gaetanagnesi è gelosa.»

«Gelosa? Di me, poi? Posso concederti che consideri te come una sua esclusiva proprietà, ma quanto a me... mi degna di attenzione solo quando riesce a risolvere un problema prima che io abbia finito di enunciarlo.»

Per quanto esposta con voce bassa, la protesta del GC è comunque troppo rumorosa per il ristorante dell'albergo perso in una valletta delle Alpi Bernesi. Una ventina d'occhi svizzeri lanciano discreti sguardi di disapprovazione verso il tavolo dove Alice, Piotr, Rudy (e naturalmente Gaetanagnesi) stanno aspettando la seconda portata della cena.

«Non dire sciocchezze. La micia è democratica come lo sono tutte le regine: tutti i suoi sudditi sono uguali, ai suoi occhi felini. E tu oggi l'hai tradita.»

«Vuoi farmi davvero credere che mi tiene il muso per colpa di Poldo? Ma se l'ho frequentato solo stamattina, per pochissimo tempo e in maniera del tutto innocente!»

«Pochissimo tempo, mah... – replica Alice – già questo è da vedere. Mi ricordo benissimo l'ora, mi rimbomba ancora negli orecchi la tua prosopopea mentre declami: "Sono le dieci e mezza, il Sole splende, la temperatura è moderata da una leggera brezza, il percorso è pianeggiante come una pianura svizzera, nella quale d'altro canto ci troviamo. Che cosa volete di più dalla vita?". Sembravi la pubblicità di un digestivo.»

«Questo è vero, GC – si intromette Piotr – e a dire il vero, non ho ancora capito da dove sia saltato fuori quel nome. Non avevi detto che si tratta di un cane pastore svizzero?»

«Appunto. E svizzero tedesco, per la precisione. Come vuoi che io possa conoscere, e per di più ripetere, un nome indigeno? Quindi l'ho chiamato Poldo; peraltro, sembrava capire che mi rivolgevo a lui, no?»

«Non ne ho dubitato un istante – mugugna Alice – l'ho sempre detto che hai l'apertura mentale di un Rottweiler imbufalito.»

«Le sole parole tedesche che io ricordo sono *Brau, Schweinaxe* e *Röstli*, e stavo giusto pensando che fosse giunto il momento di ripeterle a quel cameriere laggiù, che ci ignora da una buona mezz'ora...».

«Doc, il tuo fabbisogno odierno di calorie è stato soddisfatto anni fa. Contando quello che mangerai stasera, dovresti essere a posto per almeno un paio settimane del prossimo millennio.»

«È solo che io sono previdente. Me l'hai detto anche stamattina, ricordi? Quando ognuno di noi ha scelto la via preferita per tornarsene qui, alla base.»

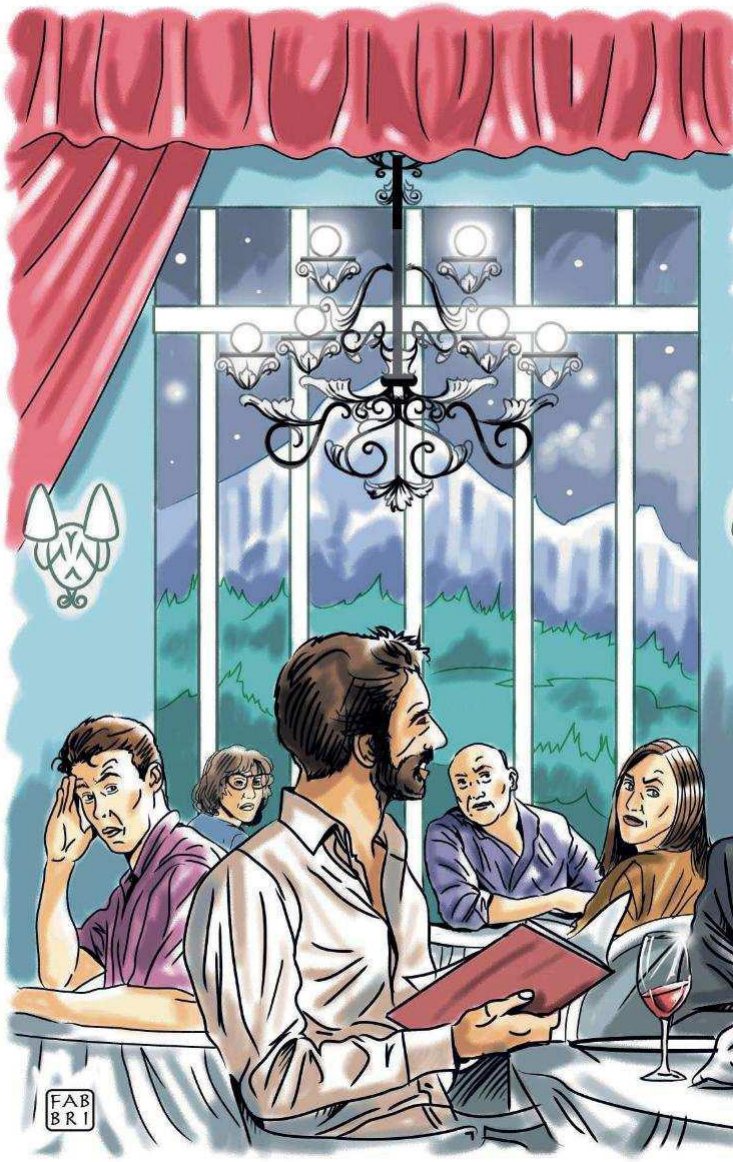


Illustrazione di Stefano Fabbri

«Ricordo perfettamente: affamato al pari del Conte Ugolino, hai sentenziato: "Voi prendete pure la strada che preferite, io prenderò quella che mi porta più rapidamente all'albergo", e poi mi hai sorpreso davvero quando hai aggiunto: "...e so bene che non è la via diretta attraverso il bosco: sappiamo tutti che poco distante da qui c'è quella stradina perfettamente rettilinea che arriva proprio all'albergo, sulla quale teniamo una velocità doppia rispetto a quella che teniamo nel bosco. Quindi, ottimizzerò il percorso rispetto al tempo". Quando è applicata al cibo, sembra che ti venga assai bene perfino la matematica.»

«Su questo il Capo ha ragione, Doc. Dovresti farti analizzare da un'equipe mista di psichiatri, matematici e dietologi, ne salte-

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di luglio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

In attesa della cena, i Rudi si cimentano sul percorso più breve che li ha portati in un ristorante di una valle alpina

IL PROBLEMA DI MAGGIO

Il mese scorso si parlava di una variazione (o meglio di ripetizioni) del gioco di Monty Hall.

Si ricorderà che, nel gioco «base», la probabilità di vittoria effettuando il cambio vale 2/3. Per i giochi successivi, la tattica migliore è analizzare il valore atteso di vincita: detti *V1*, *V2*, *S1* e *S2* la vittoria o sconfitta nel primo o secondo gioco, *P* la probabilità e «*c*» il valore di una crocchetta, nel gioco a una ripetizione (raddoppiando la posta al secondo giro), il valore atteso di vincita *E* è dato da:

$E = [P(V1) \times c] + [P(S1 / V2) \times 2c)]$.

Valorizzando le probabilità, si vede che vincere entrambi i giochi (E_{VV}) porta a $E_{VV} = [2/3 \times c] + [1/3 \times 2/3 \times 2 \times c]$, mentre perdere il primo e vincere il secondo (E_{SV}) porta a $E_{SV} = [1/3 \times c] + [2/3 \times 2/3 \times 2 \times c]$. Il valore di E_{SV} è maggiore (anche se di poco) di E_{VV}, quindi la strategia da seguire è quella che tende a perdere il primo gioco e vincere il secondo. In termini operativi, non cambiare scelta nel primo gioco di Monty Hall e cambiarla al secondo. Nel caso di tre ripetizioni (con posta tripla al terzo) si dovranno calcolare i valori attesi di E_{VVV}, E_{SVV}, E_{VSV} e E_{SSV}, essendo illogico provare a perdere il gioco finale con la posta più alta. Si trova così che conviene perdere al primo gioco ed è indifferente il risultato del secondo, quindi la strategia ottimale è 1.Tieni 2.Tieni/Cambia 3.Cambia.

rebbero fuori delle belle. Io, invece, come si conveniva a una signora, sono arrivata alla stradina seguendo il percorso più breve, e poi l'ho fatta tutta godendomi la vostra assenza. E anche quella di Poldo.»

«Quella era facilissima da godersi: quel cagnone ha non solo il tatto, ma anche la potenza d'un carro armato: ha preso la via drittissima e animalesca, ottimizzando lo spazio con una bella linea retta, infischiandone alla grande del fatto che fosse tutta all'interno del bosco. Almeno in questo si è differenziato da Rudy, che s'è inventato quel percorso stranissimo...»

«Perché stranissimo? Sono stato motivato da ragioni geometriche ed estetiche, che tra l'altro mi consentivano una bella fumata di pipa, peraltro consentita solo sulla stradina: te l'ho detto, no, che avrei fatto un percorso nel bosco esattamente simmetrico a quello di Doc rispetto al percorso di Alice... un po' di stradina in più, più tempo per fumare la pipa, che nel bosco non si può.»

«Resta stranissimo, Rudy – dice Piotr scuotendo la testa – almeno per le persone normali. Non per niente hai camminato tre chilometri più di me.»

Alice carezza la micia, che sta agitando pericolosamente la coda: «Tanto lo abbiamo capito tutti, dove stai andando a parare, GC... quindi, facciamola corta: confermi quel che hai detto durante l'antipasto, cioè che quello di noi che ha tenuto la velocità media più alta ha viaggiato a 5,5 chilometri l'ora?»

«Certo che confermo. È un dato che serve per poter calcolare a che ora è arrivato ciascuno di noi e che distanza ha percorso.»

«Ecco qua, ci voleva tanto? Lo sapevamo tutti che saresti uscito con qualche stramaledetta domanda... Beh, facciamo che io rispondo a metà delle domande: ho visto benissimo che tu e Poldo siete arrivati assieme...»

«D'accordo, ma sii corretto: io non porto orologio e quindi non so che ore fossero, quando siamo arrivati. E comunque, come al solito hai lasciato la parte difficile a Treccia: sono il tempo e lo spazio percorso da voi due, il vero problema.»

«Siete insensibili, tutti e due – ringhia Alice – qui il vero problema è che la gatta è ancora molto offesa, e si sta agitando assai nervosamente.»

«Ho paura, cara dottoressa Riddle, che la sua sollecitudine verso la micia le annebbi il proverbiale senso critico e d'osservazione,» afferma Doc, con un gran sorriso sulle labbra: «Sono ormai dieci minuti che Gaetanagnesi mugola verso Poldo in tono tutt'altro che aggressivo, direi piuttosto complice. E Poldo, che scommetto non vi siete neppure accorti che si è accampato sotto il nostro tavolo prima ancora che noi prendessimo posto, replica con sommessi latrati conniventi.»

Rudy e Alice strabuzzano gli occhi e chiedono in coro: «E che cosa diavolo ci trovi da sorridere, in tutto ciò?»

«Beh, sono appena partiti come razzi verso la porta della cucina... sono pronto a scommettere che nel giro di cinque secondi da quella soglia compariranno le nostre tre porzioni di stinco. Patate comprese.»

All'origine delle nostre facoltà

Lo strano ordine delle cose
di Antonio Damasio
Adelphi, Milano, 2018, pp. 354 (euro 29,00)

È possibile spiegare le caratteristiche umane, specificatamente umane, a partire dai batteri? Possiamo affrontare coscienza, cultura, soggettività – concetti intorno ai quali la filosofia si è interrogata per millenni – guardando alle viscere degli animali e alle membrane cellulari? Secondo Antonio Damasio, non solo si può fare, ma è necessario.

Impegnato ormai da anni nella demolizione della tesi secondo cui ragione ed emozioni sono contrapposte e che proprio questa opposizione sarebbe ciò che ci rende umani (è questo «l'errore di Cartesio», da cui il titolo del libro che l'ha reso famoso anche in Italia), il neuroscienziato e filosofo portoghese che da oltre tre decenni vive negli Stati Uniti, aggiunge un altro pezzo al suo grande disegno di rintracciare l'origine delle facoltà intellettuali e culturali umane nelle caratteristiche più fondamentali dei viventi.

«Lo strano ordine» di cui parla il titolo è anzitutto un ordine cronologico che sembra cozzare con il senso comune che ritiene alcuni tratti specifici della nostra specie, ma che in realtà sono stati sviluppati milioni di anni prima da animali che ci hanno preceduto – e di molto – sulla Terra: insetti che misero in atto «un complesso di comportamenti, di pratiche e di strumenti sociali che si possono correttamente chiamare culturali, quando lo confrontiamo con gli equivalenti umani». Ancora prima, organismi addirittura più semplici composti da un'unica cellula «esibivano comportamenti sociali i cui schemi si conformano ad aspetti dei comportamenti socioculturali umani». Come a dire: certe cose non sono apparse nell'ordine che vorremmo, con noi umani al vertice di una sorta di scala della natura, e inoltre quello che consideriamo essere tipico della nostra specie (per esempio, la cultura, la capacità di provare sentimenti, di comunicarli) altro non è che un correlato dell'evoluzione di alcune caratteristiche rintracciabili sin dall'inizio della vita sul pianeta.

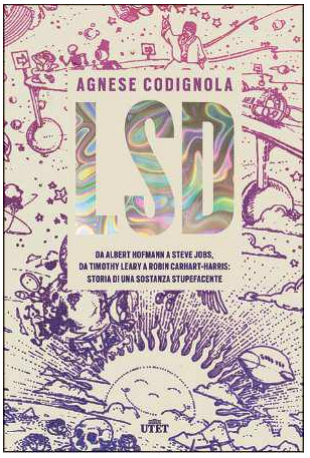
Queste caratteristiche peculiari dei viventi portano all'altro significato di «ordine»: gli organismi – dai procarioti in poi – esibiscono capacità di mantenere strutture e forme ordinate obbedendo semplicemente all'imperativo dell'omeostasi, cioè del mantenimento di un equilibrio dinamico dell'ambiente interno all'organismo rispetto al mondo esterno. Così se un batterio è in grado di mantenere l'omeostasi grazie alla cooperazione con i suoi colleghi della colonia, lo stesso imperativo omeostatico è quello che ha stimolato risposte umane che «sono cominciate con i ventilatori e sono sfociate nell'aria condizionata»: questo accade perché il nostro corpo, lontano erede delle capacità dei batteri ha evoluto una serie di sistemi organici in grado di «sentire» i cambiamenti all'interno dell'organismo e reagire di conseguenza; al caldo rispondiamo non solo con maggiore traspirazione e altre variazioni comportamentali (tra cui minore efficienza mentale), ma anche con risposte tecnologiche.

Ecco quindi che non possiamo separare l'intelletto dai «sentimenti», intendendo con questo termine le esperienze che si riferiscono al corpo da cui emergono, e producono immagini mentali dell'interno del corpo. Un sentimento è la sensazione di benessere dopo esserci saziati o il malessere dovuto alla disidratazione: segnali che il corpo stesso invia e gestisce attraverso processi non coscienti, in grado di valutarne la «valenza» positiva o «negativa», ma che l'evoluzione ha portato a picchi di notevole complessità con l'emergere della mente e quindi della coscienza.

Grazie a questa chiave evolutiva, diventa affascinante e per molti tratti anche convincente la narrazione di Damasio rispetto all'unità dell'organismo in tutti i suoi aspetti, con il sistema nervoso a far da collante in quanto messaggero dei segnali e poi, con l'evoluzione dei cervelli sempre più complessi, anche in grado di elaborare le unità minime «sentimentali». La proposta di Damasio è ancora più stimolante perché fornisce anche strumenti per rileggere e dare nuovi significati a dibattiti e concetti filosofici antichi, usando neuroscienze e biologia, senza però perdere di vista i connotati specifici che rendono la nostra specie così particolare.

Mauro Capocci

Le vicende esemplari della storia dell'acido lisergico



LSD
di Agnese Codignola
UTET, Torino, 2018,
pp. 272 (euro 19,00)

Andare a cavallo è più pericoloso di assumere ecstasy e potremmo prevenire i rischi vietandolo. Sareste d'accordo? Così il neurofarmacologo britannico David Nutt aveva provato, in un editoriale del 2009, a sottolineare l'assurdità delle politiche sulle droghe e la necessità di un dibattito più razionale. Era finita malissimo sia per Nutt, costretto a scusarsi per aver detto un'ovvietà, sia per il dibattito. Un destino simile ha caratterizzato molte altre sostanze. Una storia esemplare è quella dell'LSD: sintetizzato dallo svizzero Albert Hofmann nel 1943, nel 1971 le Nazioni Unite ne vietano uso e sperimentazione.

La giornalista Agnese Codignola racconta come questa sostanza resa famosa dallo scrittore britannico Aldous Huxley, diffusa a Hollywood e tra gli hippy negli anni sessanta, sia stata poi proibita non solo per l'uso personale e ricreativo, ma anche per fini sperimentali in contesti sicuri e controllati. La vicenda dell'LSD (il cui nome chimico è dietilamide-25 dell'acido lisergico) è sicuramente particolare, tuttavia descrive molto bene l'effetto e i danni dei pregiudizi sulla ricerca e sulle policy (il proibizionismo è più dannoso delle sostanze vietate), diventando così un caso esemplare. Codignola riporta poi i recenti studi sui malati terminali o sulle dipendenze che potrebbero cambiare la nostra percezione rispetto alle sostanze psicoattive, alleggerendo i divieti e lo stigma spesso dovuti a usi sbagliati – ricordiamo che il principio cardine della tossicologia è la dose e non una magica «essenza» delle sostanze.

Insomma, il cosiddetto rinascimento psichedelico potrebbe offrire conoscenze e strumenti terapeutici incredibili e sprecarli sembra davvero sciocco.

Chiara Lalli

Uno sguardo alle scatole nere dell'era digitale

Alija/iStock

Che cosa vogliono gli algoritmi
di Ed Finn
Einaudi, Torino, 2018,
pp. 236 (euro 20,00)

Nel romanzo *Babel-17* del 1966, lo scrittore statunitense Samuel R. Delany immaginava che gli Invasori avessero un'arma micidiale per vincere la guerra contro l'Alleanza: un linguaggio artificiale che programma gli esseri umani affinché distruggano i propri simili. Linguaggio inteso come insieme di istruzioni, e in questo senso algoritmo, che ha come scopo la risoluzione di un problema, di cui Ed Finn, fondatore del Center for Science and the Imagination all'Università dell'Arizona, traccia i legami con un'apparente magia: avviamo l'algoritmo e otteniamo un risultato, senza preoccuparci di come siano organizzate le istruzioni. Anzi, in alcuni casi gli algoritmi sono scritti da altri algoritmi. Oggi «gli algoritmi sono ovunque», scrive Finn: «Dominano il mercato azionario, compongono musica, guidano auto, scrivono articoli di giornale e scovano dimostrazioni matematiche: il loro potere creativo sta solo cominciando a prendere forma». Finn si interroga sulle conseguenze di tanto potere in mano a «scatole nere» che funzionano, ma non sappiamo davvero bene come raggiungano il risultato.

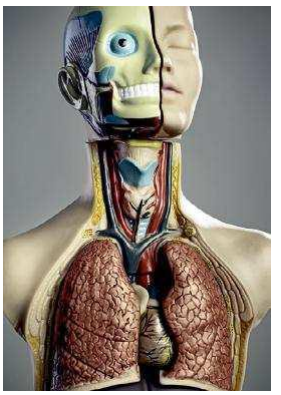
Ecco, quindi, sorgere la domanda implicita nel titolo: gli algoritmi che ci circondano sono dotati di intenzionalità? La risposta di Finn è ambigua: «Non abbiamo prove per sostenere che gli algoritmi abbiano intenzionalità, creatività o qualsiasi altro tratto che consideriamo necessario per l'immaginazione». Eppure, l'analisi di algoritmi famosi, come quelli dietro a Siri e Netflix, lascia aperto qualche interrogativo, fa correre qualche brivido lungo la schiena. Per tranquillizzarci, auspica Finn, serve una nuova disciplina, una sorta di scienze umane sperimentali, perché la conoscenza è il miglior antidoto alle paure.

Marco Boscolo

Un viaggio dentro il corpo umano

L'aforisma «conosci te stesso» fatto risalire all'antica Grecia è arrivato a Napoli sotto forma di viaggio dentro il corpo umano. Alla Città della Scienza, nel quartiere Bagnoli, fino al 24 giugno è possibile visitare la mostra *Human Bodies*, un'occasione assai particolare per conoscere il nostro corpo.

Il percorso espositivo è diviso in otto aree: lo sviluppo del corpo, lo scheletro, il sistema muscolare, quello respiratorio, il sistema digerente, quello nervoso e come ultimo il sistema urinario e riproduttivo. Protagonisti della mostra sono corpi umani nella loro interezza e oltre 150 organi reali, donati da singoli (che hanno avuto stili di vita sia salutari sia dannosi) per scopi scientifici e resi disponibili grazie al processo di plastinazione, che permette di conservare organi e tessuti mantenendone le caratteristiche originali. Questo libro di anatomia tridimensionale ha una sinergia con Corporea, il primo museo interattivo d'Italia sul corpo umano, che è possibile visitare sempre alla Città della Scienza di Napoli. Inoltre *Human Bodies* ha in programma un ciclo di conferenze di approfondimento con esperti del mondo medico e scientifico. Per tutte le informazioni: http://www.cittadellascienza.it. (*cb*)

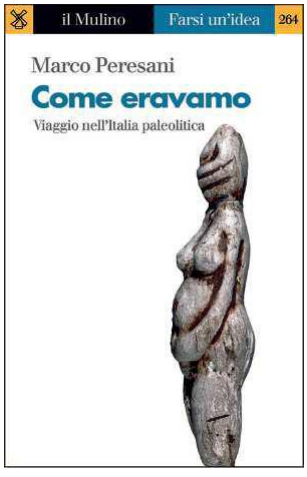


Genomica sociale
di Carlo Alberto Redi e Manuela Monti
Carocci, Roma, 2018, pp. 175 (euro 15,00)

Disuguaglianze, salute e geni: quando il sociale si fa biologico

Il titolo è un po' limitativo, perché il libro presenta innanzitutto una estesa panoramica delle disuguaglianze socioeconomiche, globali e italiane, esaminando come si sono generate storicamente e modificate negli ultimi decenni, qual è il quadro attuale, e come le disparità economiche si traducono in forti disuguaglianze di salute, che compromettono durata e qualità della vita di chi ha meno risorse. I nessi che traducono lo svantaggio socioeconomico in guai di salute sono a loro volta molteplici, spaziando dalle condizioni e abitudini di vita meno salubri al minore accesso alle cure, viste anche le difficoltà di una sanità pubblica non più così universale e gratuita come dovrebbe.
Ma oltre a tutto ciò, e in parte in conseguenza di tutto ciò, è emerso sempre più chiaro negli ultimi anni un altro nesso: quello mediato dal DNA e soprattutto dall'epigenetica, cioè quelle modifiche transitorie al DNA, o alle proteine che lo circondano, che si producono in risposta a fattori ambientali e modificano l'azione dei geni. Modifiche transitorie, ma fino a un certo punto, visto che alcune sono trasmesse ai figli e anche oltre, influenzando le generazioni successive a quella che ha subito l'influsso ambientale. E favorendo il perpetuarsi delle disuguaglianze.
Tante disparità ambientali legate all'equità sociale si ripercuotono sul DNA, spiegano Redi, biologo e accademico dei Lincei, e Monti, che insegna biologia delle cellule staminali all'Istituto universitario di studi superiori di Pavia. Già trovarsi in uno status di inferiorità sulla scala sociale può aumentare la condizione di stress e con essa l'attività di geni che regolano l'infiammazione e l'immunità, a detrimento della salute.
Un caso eclatante è l'obesità, che si sta caratterizzando sempre più come una condizione dei ceti meno abbienti. Anche qui le condizioni di vita che favoriscono la disparità, come il consumo di cibi economici e ricchi di calorie e le minori occasioni di attività fisica, influenzano anche il DNA: i figli di genitori obesi, o di madri che in gravidanza hanno sofferto la denutrizione, per vari meccanismi epigenetici saranno più soggetti a disturbi del metabolismo energetico e a conseguenze quali sovrappeso e obesità. A questi si aggiungono altri esempi di come «il sociale si fa biologico» per] altre vie, per esempio le vaccinazioni. In conclusione si esaminano i percorsi per uscire dalle trappole e dai circoli viziosi della disparità e sfruttare le possibilità sempre più ampie, ma non sempre più accessibili, che gli sviluppi della medicina stanno aprendo.

Giovanni Sabato



Come eravamo
di Marco Peresani
Il Mulino, Bologna, 2018, pp. 145 (euro 11,00)

La straordinaria ricchezza del Paleolitico italiano

Pubblicato nella fortunata, e ormai ricchissima, collana *Farsi un'idea* della casa editrice Il Mulino, questo libro ha lo scopo di fornire le coordinate generali dell'Italia paleolitica, presentando studi e reperti che ci raccontano questo lungo periodo della nostra evoluzione. L'autore, Marco Peresani, è coinvolto in prima persona in questa avventura esplorativa: docente di culture del paleolitico all'Università di Ferrara e all'Università di Verona, coordina progetti di ricerca sul popolamento umano della penisola italiana e delle Alpi nel Paleolitico.
Nella prefazione, l'autore esordisce proprio mostrandoci tutte le difficoltà di effettuare uno studio su un sito paleolitico, tra le mille responsabilità di avviare interventi irreparabili, la necessità di un aggiornamento costante e la gestione coordinata di gruppi multidisciplinari. Nel suo passaggio a disciplina sempre più connotata sul piano scientifico, l'archeologia è diventata un'attività corale, in cui le diverse competenze contribuiscono a dipingere un quadro sempre più dettagliato e fondato. Un lavoro, lo si scopre pagina dopo pagina, per il quale resta ancora tantissimo da fare: nessun rischio di annoiarsi per gli archeologi del futuro che sceglieranno di occuparsi delle prime tracce umane nel territorio italiano.
È una storia che si snoda sullo sfondo di un'Europa dal paesaggio e dal clima profondamente diversi rispetto a quelli attuali, con una flora e una fauna che oggi non riconosceremmo, e in cui appaiono, a un certo punto, le tracce dell'arrivo di *Homo sapiens* e del suo incontro con l'autoctono *Homo neanderthalensis*. Una fase che l'autore definisce «uno dei momenti più intriganti dell'evoluzione umana», per via dell'ampio dibattito che ha alimentato tra paleoantropologi, archeologi, evoluzionisti e altri scienziati. Questioni centrali di cui ci parlano le tantissime testimonianze disseminate nel territorio italiano. La nostra penisola offre una straordinaria ricchezza di siti paleolitici: un primato che ci riempie d'orgoglio, ma che costituisce anche una responsabilità non da poco, che non si limita alla sola custodia, ma riguarda anche lo studio e la valorizzazione delle testimonianze.
Per contribuire alla divulgazione dei tesori del Paleolitico italiano, l'autore dedica una sezione proprio a siti e collezioni accessibili al pubblico, distribuiti in buona parte del territorio nazionale, da nord a sud. Allo stesso scopo mirano i consigli di letture di approfondimento che chiudono il volumetto: testi divulgativi, in italiano, tutti pubblicati negli ultimi dieci anni, per saziare a volontà l'appetito stuzzicato dal libro.

Anna Rita Longo

Che cosa significa essere umani

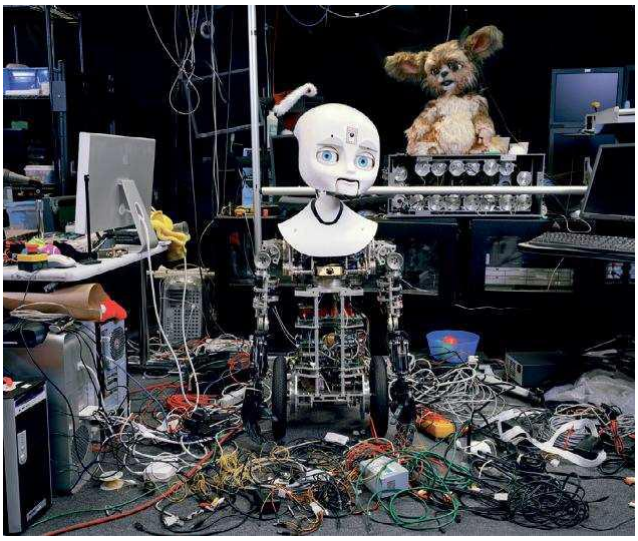
Una mostra al Palazzo delle Esposizioni di Roma indaga sul nostro rapporto con la scienza e la tecnologia, e su quello che potrebbe riservarci il futuro

Nel *Fedro*, Platone mette in bocca a Socrate una critica della scrittura, sostenendo che se interrogati, i discorsi messi per iscritto, «ti manifestano una cosa sola e sempre la stessa». La scrittura serve solo a chi sa già ricordare, sostiene il filosofo, inaugurando un filone di riflessione sul ruolo che le tecnologie, come la scrittura, hanno nel potenziare (o meno) l'essere umano. Una preoccupazione che avevano i contemporanei di Galileo, quando nel XVII secolo si domandavano se ciò che una protesi come il cannocchiale permetteva di vedere era reale o frutto dell'inganno.

La prima sezione di *HUMAN+* ci ricorda che, volenti o nolenti, siamo sempre stati *cyborg* perché abbiamo sempre fatto affidamento ad appendici e miglioramenti (vedi la chirurgia) per il potenziamento delle facoltà. Una caratteristica che il progresso tecnologico e scientifico ha reso pervasiva in diversi ambiti, fino al punto che come specie abbiamo profondamente modificato il pianeta su cui viviamo, addirittura, ce lo ricorda la terza sezione, vivendone le conseguenze, come il cambiamento climatico. Sorgono allora interrogativi sollevati dalle 40 opere di artisti, *designer* e scienziati, tra i quali vale la pena ricordare Neil Harbisson, il primo cyborg vivente; Stelarc, uno dei più grandi *performer* australiani; e Oron Catts e Ionat Zurr, i creatori delle bambole scacciapensieri semi-viventi, le prime sculture di ingegneria tissutale a essere esposte in una galleria. Quando parliamo con l'assistente virtuale dello *smartphone*, altra protesi, interagiamo con qualcosa di reale, artificiale o dalla doppia natura? Vedere alla seconda sezione, dedicata all'incontro con gli altri. E qual è il limite del prolungamento della vita con le macchine? Quando è eticamente accettabile intervenire con la medicina e quando invece non lo è? Provano a rispondere le opere della quarta sezione, dedicata ai limiti della vita biologica.

Pensata per Roma è la sezione curata da Valentino Catricalà della Fondazione Mondo Digitale, che ha coinvolto quattro artisti e due collettivi per la realizzazione di opere originali che dessero un contributo al dibattito sollevato da protesi, miglioramenti e appendici: che cosa significa essere umani?

Marco Boscolo



Opere provocatorie. Sopra, *Leonardo sogna le nuvole*, scultura cinetica di Donato Piccolo: è una riproduzione realistica del viso del Guerriero di Leonardo da Vinci che muove le labbra ed espelle nuvole di fumo ad intervalli irregolari. Sotto e accanto, *Versione umana 2.0*: l'opera di Yves Gellie, composta da ritratti di robot umanoidi fotografati nel loro ambiente originario.

Dove & quando:

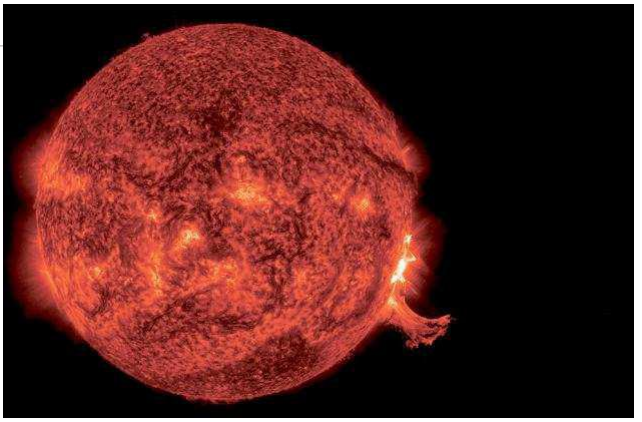
HUMAN+. Il futuro della nostra specie
Palazzo delle Esposizioni, Roma
Fino al 1° luglio 2018
https://www.palazzoesposizioni.it/

Angelo Sabatiello (*in alto*); Photo courtesy of the artist. Courtesy Baudoin Lebon (*sotto, 2*)

La vita segreta del Sole

di Rebecca Boyle

Una stella tutto sommato banale, con un'esistenza non molto interessante: così gli astronomi hanno pensato al Sole fino a poco tempo fa. Recenti osservazioni suggeriscono però che la nostra stella abbia avuto una ricca vita familiare, con tanto di «madre», «zii» e anche svariati «fratelli»: a uno dei quali potrebbe persino aver sottratto un pianeta.



Dossier: le malattie di un mondo che cambia

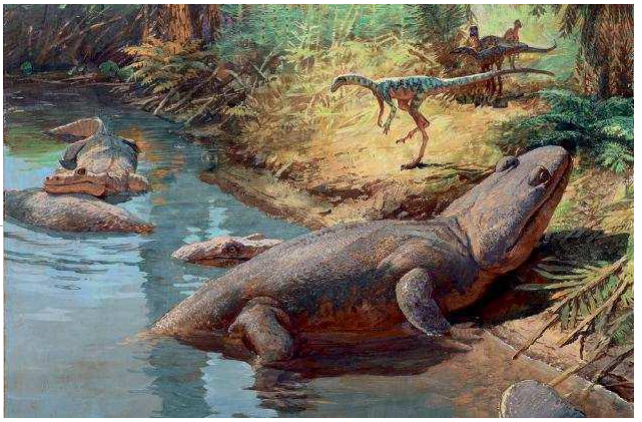
di M. Wenner Moyer, L. Parshley, Luca Lucentini e Giuseppe Costa

Il cambiamento climatico in atto, le crescenti disuguaglianze economiche e l'urbanizzazione incontrollata stanno accelerando la diffusione di alcune malattie in aree del mondo diverse da quelle dove finora erano endemiche e il ritorno di altre patologie che si ritenevano ormai sotto controllo.

Il trionfo improbabile dei dinosauri

di Stephen Brusatte

Nuovi studi e scoperte fossili ribaltano la tradizionale immagine di un repentino trionfo dei dinosauri sulle specie rivali dovuto alle loro caratteristiche «superiori», dimostrando invece che languirono ai margini del quadro evolutivo per decine di milioni di anni prima di essere in grado di conquistare il pianeta.



NASA/SDO (*Sole*); James Gurney (*dinosauri*)

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - maggio 2018

Copyright © 2018 by Le Scienze S.p.A.
ISSN 2499-0590

Tutti i diritti sono riservati.
Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *Robot autodidatti, Fusione;* Elisa Dalgo: *L'albero del cancro*; Silvio Ferraresi*: Ripensare il cervello;* Eva Filoramo: *La bestia perfetta;* Daniele Gewurz: *Lampi nella notte;* Alfredo Tutino: *Prevenire il suicidio.*

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n.196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs.196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopraindicato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Ufficio abbonamenti e Servizio Grandi clienti
Tel. 0864.256266
Fax 02 26681991

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8467 del 21/12/2017

LEGGERE, APPROFONDIRE, COLLEZIONARE.

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

ABBONATI SUBITO

CON QUESTA PROPOSTA SUPERVANTAGGIOSA.

PIÙ AUMENTA LA DURATA, PIÙ RISPARMI!

DURATA	PREZZO INTERO	PREZZO PER TE
1 ANNO 12 numeri	~~€58,80~~	€39,00
2 ANNI 24 numeri	~~€117,60~~	€75,00
3 ANNI 36 numeri	~~€176,40~~	€99,00

Solo con l'abbonamento puoi consultare su
www.lescienze.it il ricchissimo archivio dal 1968 ad oggi.

APPROFITTA DI QUESTA OFFERTA SPECIALE!

- Collegati al sito www.ilmioabbonamento.it
- Se preferisci telefona al numero 0864.25.62.66

Buonanotte ai russatori.

Sanispira Dolcenotte. Un filtro nasale che riduce il russare.

Stanco di dormire male e fare dormire male il tuo partner? Il filtro **Dolcenotte**, con essenza di cirmolo e camomilla, aiuta a ridurre il russare favorendo il tuo riposo. Leggero e comodo da indossare può essere utilizzato più volte. **In farmacia.**

So.Se. PHARM
INDUSTRIA FARMACEUTICA

È un dispositivo medico CE. In farmacia. Leggere attentamente il foglio illustrativo. Aut. Min. n° 575 del 7/05/2018